Science Council of Canada
Conseil des sciences du Canada

Discussion Paper

Ideas Alive: Theoretical Biology in Canada

Paul J. Buckley

IDEAS ALIVE
Theoretical Biology in Canada

A Discussion Paper
by Paul J. Buckley

May 1985

Discussion papers are working documents. They are made available by the Science Council of Canada, in limited numbers, to interested groups and individuals for the benefit of their comments.

The views expressed in this discussion paper are those of the author and are not necessarily endorsed by the Science Council of Canada.

Copies of

Ideas Alive: Theoretical Biology in Canada

are available
free of charge from:

The Publications Office
Science Council of Canada
100 Metcalfe Street
Ottawa, Ontario.
K1P 5M1

Des exemplaires de
Des idées bien vivantes -- La biologie théorique au Canada
sont disponibles gratuitement.

© Minister of Supply and Services, 1985

Catalogue No. SS21-5/1985-2E
ISBN No. 0-662-13959-3

CONTENTS

Foreword 5

Preface 7

Acknowledgements 9

I. The Context of Theoretical Biology Research 11

Mathematics, Theory, and Biology 11
Research Subjects of Interest 12
The Impact of Theory 12

II. Conducting Research in Theoretical Biology 16

Impediments to Research 16
Factors Promoting Research 17
Funding for Research in Theoretical Biology 17
Academic Programs 18

III. Reflections on Policy 21

Communication and Collaboration between Experimental and Theoretical Biologists 21
The Canadian Society for Theoretical Biology 23
Research Funding 24

Appendix 1: Agenda for the Workshop on Theoretical Biology 25
Appendix 2: List of Workshop Participants 26
Appendix 3: Survey Questionnaire 27
Appendix 4: Some Results from the Survey 28

Notes 30

FOREWORD

Theoretical biology, as I would describe it, can be done at any of several distinct levels. For many people, the construction and testing of specific models of individual biological systems and biological behaviours is the essence of theory. Despite all the resistance to theory in general on the part of experimental biologists, the indispensability of modelling has won a grudging but continually growing acceptance.

In addition to studying individual models of specific biological systems, one can study classes of such models, which are united by certain common properties and which are potential models for some particular real system. The study of neural nets, or of reaction-diffusion equations so much in vogue today, is of this type. I like to call these approaches metaphorical: they are approaches not to an individual biological system or behaviour, but to a whole class of them; for example, evolution, growth, development, differentiation, and indeed the nature of life in general. One can proceed one level further, and study classes of classes of such potential models and the interrelationships between them. It is only at this level that the fundamental claims of reductionism itself can be investigated, for example.

When I was a graduate student, less than 30 years ago, I could know personally every theoretical or mathematical biologist in the world. Now this is not possible for there are thousands of them. When I was a graduate student, a single journal served the entire enterprise; now there are between a half-dozen and a dozen, and perhaps a dozen more specializing in particular problem areas. The "experimental" journals will now consider and accept manuscripts with a central theoretical component. Despite this, there are more manuscripts than can be handled. To give one example of the growth in publishing, the Journal of Theoretical Biology has grown from a single volume of four issues annually to a biweekly publication; and its editors reject manuscripts at the rate of about 70 per cent, at least partly because of limitations of space.

All this activity has occurred primarily because of a massive immigration of scientists into biology from other more quantitative disciplines. Physicists, mathematicians, engineers, statisticians, and specialists from other fields are affiliating themselves more and more with biological problems from the most applied to the most esoteric. A similar influx happened in the early days of molecular biology, when there was a massive migration of experimental physicists into biology.

Theoretical biology is exploding even in the face of powerful inhibitory pressures. It is imposing itself on every aspect of biomedical research and into every level of biological organization. This phenomenon has

not been recognized for the rather miraculous situation it is, but it is phenomenal nevertheless.

Robert Rosen
Department of Physiology and Biophysics
Dalhousie University
Halifax

PREFACE

> These are heady times in theoretical biology. There are ongoing major revolutions to create theory on the horizon. There is an opportunity for Canada to spur the growth of a very important young discipline.[1]

Current developments in theoretical biology owe much to the convergence of seminal contributions from a number of fields such as biology, physics, chemistry, mathematics, physiology, and medicine. People from these core disciplines have come together to develop mathematics and ideas and concepts useful for biology -- a science that we heretofore associated with taxonomy. The shift from emphasizing description to emphasizing explanation in biology is slowly under way and represents a kind of paradigm shift. The recent development of theoretical explanation in biology parallels that which has already occurred in chemistry and physics. In these disciplines theory and experiment are now closely interwoven. (This has happened only partially in biology as yet.) This study takes its impetus from the feeling among practitioners in the field that the work is exciting, distinct, and moving ahead, perhaps nearing breakthrough in some areas.

The origins of this study lie with a fact-finding tour of basic research in Canada, which was conducted by the author in late 1982 and early 1983. The purpose of meeting with some 33 physicists, chemists, biologists, and mathematicians in nine universities across Canada was to become familiar with a sampling of the scientific research, looking particularly for common problems. (In the field of science policy this kind of exploration is usually termed a health of science survey.) Several of the issues raised during that tour reappear in this study, but the main point I wish to make is that one of the scientists interviewed -- a biologist[2] -- suggested that theoretical biology in Canada should be examined, having been somewhat neglected. There seemed to be some problems associated with the doing of theoretical biology, a view that was supported by several other people.

It became clear to me that the discipline of theoretical biology is an important one, meriting particular attention. The theoretical foundations of biology are in the process of being created in a multidisciplinary manner -- a notable development in contemporary science. It has been stressed that theory in biology has at least an equal voice with experiment in deciding what the form and content of biology as a science will be. As well, theoretical developments have found important practical applications in ecology, fisheries management, clinical physiology, neurophysiology, and other fields. Some examples of research projects now under way in theoretical biology are listed in Chapter 1.

It seemed to this writer that a workshop might be opportune. This idea was confirmed by a dozen or so practising theoretical biologists. The workshop was cosponsored by the National Research Council of Canada and the Science Council. Some 22 scientists from many disciplines attended the workshop, which took place in November 1983 in Ottawa. One of the workshop's recommendations was that the Science Council undertake a study of theoretical biology in Canada. This was agreed to by the Science Council; hence the present document.

The intention of the workshop was to explore the actual and desired shape of theoretical biology research; provide an overview of current investigations in Canada; and examine some related policy questions. The agenda for the meeting is reproduced in Appendix 1. Appendix 2 lists the workshop participants. Among them are theoretical biologists working in government and in various university departments, such as botany, biology, chemistry, physics, mathematics, physiology, and medicine.* The Marine Ecology Laboratory of the Bedford Institute of Oceanography was represented, as were two divisions (chemistry and biology) of the National Research Council. One of the main policy results of the meeting was the resolution to constitute theoretical biologists formally -- a process that is now under way.

In order to profile the fields of research in theoretical biology in Canada, the persons doing that research, and their concerns about their work, a short questionnaire was sent to about 60 researchers chosen at random (see Appendix 3). A total of 48 replies were received. From these emerges a reasonably clear portrait of the people involved in theoretical biology and of their views concerning their chosen field of enquiry. The majority of replies (18) came from members of biology departments, including botany, physiology, and zoology. The remainder were university researchers working in mathematics (10); medicine (8), including biophysics and biochemistry; physics (2); oceanography (1); electrical engineering (1); and computer science (1). Other replies were received from researchers working in government laboratories (5), a private consultant, and a biomedical engineer. Selected results from the survey appear in Appendix 4.

The observations of this study are based in part on the workshop deliberations and on the responses to the survey questionnaire. The concluding section of the paper is devoted to reflections on a science policy for theoretical biology.

Paul Buckley

---

* Preliminary research for this paper identified some 200 Canadian scientists who are engaged either full-time or part-time in theoretical biology research. This number would be significantly higher if postdoctoral fellows and graduate students were included in the count.

ACKNOWLEDGEMENTS

I am pleased to acknowledge the assistance of Brian Simms in the preparation of this report. I am grateful to the following theoretical biologists for useful comments on an early draft: Drs P. Antonelli, C.W. Clark, W.G.S. Hines, M.C. Mackey, R. Rosen, and L.E.H. Trainor.

I. THE CONTEXT OF THEORETICAL BIOLOGY RESEARCH

Theoretical biology is not a straightforward field to describe. Not only are the fundamental principles and techniques in the process of being created and discovered, but there is also great diversity of subject matter and methodology. However, the context of research in theoretical biology can be sketched so as to provide a basis for assessing policy alternatives. In this paper the context will be discussed in terms of the relations between mathematics, theory, and biology; some current research topics; and the impact of theory on biology and related disciplines.

Mathematics, Theory, and Biology

In approaching contemporary theoretical developments in biology, experimental biologists almost unfailingly encounter difficulties with the mathematical structure of theory. Their background and experience in classical biology has not prepared them for the often quite sophisticated mathematical treatment of biological phenomena that is becoming commonplace. This creates serious problems in coming to terms with the transition from a largely empirical field to one with a richer theoretical foundation. There is also a real danger that mathematical developments may lose contact with the heart of biological research. If the empiricists have difficulty in learning the required mathematics, the theorists have difficulty in learning the requisite biology. To avoid sterility in the field, the biological content of theories should be emphasized.

A major problem for theoretical biology is that it takes years for a mathematician to become reasonably well educated in biology. (In biology, as in most other fields, a little bit of learning can be a dangerous thing.) It must also be pointed out that there is more to theoretical biology than mathematics -- there are concepts and principles, usually derived from other fields, like physics -- and there is a danger of misdirecting biology by too strenuous efforts to force it into mathematical forms. Mathematical biology is not the same as theoretical biology. But, as one respondent to the survey noted, "there is also a complementary danger in ignoring the natural mathematical forms which can lend coherence and insight to masses of otherwise refractory data."

These considerations underscore the fact that communication between mathematicians and biologists on the subject of theory is often painfully difficult. Special effort is necessary for each group to educate the other in facts and attitudes. For example, without oversimplifying mathematics, ways must be found to present the results of mathematical theory to experimentalists (in chemistry many of the results of quantum theory are presented in pictorial form). Clearly, experience with modelling techniques on the part of biologists would be helpful here.

One difficulty is that, until recently, theory in biology itself has not had much

recognition. There is on the whole still an overly practical emphasis in Canadian biology. "We are a frontier society with too much emphasis on immediate practical results and not enough on the philosophical and cultural aspects of science," commented one respondent. This attitude has led some critics to question whether theoretical biology is relevant, even to biology. Others, including some theoretical biologists, complain that theoretical biology is difficult to do and that it has produced few pieces of research that can be considered great (theories about the structure of DNA are an exception, as are the less well-known theories concerning the universality of membrane structure). Sometimes the feeling prevails that what is theoretical is impractical, even though some of the experimental apparatus of the biological scientist owes its creation and development to a vast amount of theory. Some experimentalists do recognize the theory behind these developments and give credit where credit is due; but it also seems likely that, at least for the foreseeable future, the growth of theoretical biology as a discipline will continue to depend on research that tries to answer the fundamental questions of biology.

Whereas experimental biologists tend to look meticulously for the precise details of particular systems, mathematical theorists are more interested in unifying principles. For this reason, collaboration between researchers with insights into biological problems and physicists, mathematicians, engineers, and chemists is an essential part of research strategy in many areas of theoretical biology. The resistance to new ideas within the biological research community may stem from a lack of understanding of the different goals of theoreticians and experimentalists, and from inadequate attention to biological relevance in some theoretical work. Abstract theories and concepts that are deeply rooted in obscure mathematics and pay little heed to relevant biological information are of little use to the biological community and may alienate experimental biologists from such theoretical treatments. On the other hand, there are biologists who think that mathematicians and others outside the biological community cannot appreciate the relevant biology but are useful for technical support. This attitude further restricts the collaborative interdisciplinary research that theoretical biology often demands.

Research Subjects of Interest

Table 1 lists some of the topics now being explored by theoretical biologists. The brief descriptive titles indicate the breadth and depth of the research now under way across Canada.

The Impact of Theory

Theoretical biology has had a considerable impact on basic and applied biology and related disciplines, but its influence remains unrecognized and unacknowledged. Although many instrumental and other technological advances are based on theory to some extent, the contribution of theory remains hidden. Experimentalists are slow to credit theoretical biology because part of the contribution appears to have come from physics and chemistry. Also, biological theories are difficult to verify: simple experimental models cannot be set up to check complicated biological theories, as they can be in physics, for example.

Biological theory contributes not only to technological advances, but also to biological research itself. As one scientist who responded to the survey put it, "No experimental work of any value is done without there being some background idea, some theory. It is time this was explicitly recognized, and the importance of theoretical biology stressed."

The impact of theoretical biology could be enhanced by increasing the amount of direct collaboration between theoreticians and empiricists and by making major theoretical constructions more readily available to empirical biologists (for example, by publishing readable, nontechnical papers and by giving mathematics more emphasis in the early training of biologists, even at the high school level).

The impact of theoretical biology has been felt in a number of areas, including:

Table 1. Research Subjects of Interest in Theoretical Biology

Ecology	Evolution	Other
Plant/herbivore interactions	Evolution in heterogeneous environments	Receptor binding kinetics; pharmaco-kinetics
Aggregation phenomena in predators	Nonequilibrium thermodynamics and biological evolution	Macromolecular structure
Community ecology: food web structure; search for critical species	Biochemistry and molecular evolution	Quantitative phylogenetic analysis
Historical structure in ecological systems	Evolution of behaviour and life history	Theoretical and methodological ethology
Variability of plankton in space and time	Strategy models in classification and evolution	Membrane transport processes in plant cells
Multispecies fisheries	Evolutionary adaptations of insects	Probabilistic models in population biology
Persistence and mutualism in ecological systems	Genome structure and evolution	Computational problems in classification, systematics, and numerical taxonomy
Optimal harvest strategies	Evolutionary stable strategies	Neural modelling; applied neural control
Qualitative stability of ecosystem models	The origin of life problem	Cellular immunology
Niche theory	Mathematical modelling of biological and social evolution	Effects of periodic forcing on biological oscillators; applications of this effect to clinical situations
Theory of ecological analysis	Mathematical models of evolution	Immune system network theory
Connectedness in marine and freshwater pelagic food webs		Morphogenesis and pattern formation in development
		Structural and developmental biology
		Abstract bio-mathematics; category theory
		The properties of non-linear dynamical systems and bifurcations in these systems, leading to an understanding of normal and pathophysiological function

Table 1. Research Subjects of Interest in Theoretical Biology (continued)

Ecology	Evolution	Other
Theories of resource use	Conceptual apparatus of evolutionary theory	Mathematical modelling in neurophysiology
Stability of ecosystems	Evolution of the genetic system	Organization of behaviour systems
Modelling competition for space	Enzyme evolution in fishes	Discrete dynamical systems (population growth)
Mathematical modelling of renewable resources		Theory of complex systems Sequence comparison (nucleic acids; protein)
		Theoretical aspects of endocrine systems
		Time-delay models, period doubling, and chaotic behaviour
		Field approach to self-organization and pattern development
		Origins and development of the genetic code
		Population biology of marine organisms

- Diagnostics and Therapeutics: The computerized axial tomography (CAT) scanner; electrocardiography; comportmental analysis and drug studies; interpretation of glucose tolerance tests, etc.

- Neurophysiology: Basic understanding of neuronal excitability due to Hodgkin and Huxley; the Huxley model for muscle contraction; models for synaptic transmission, etc.

- Respiratory and Cardiovascular Physiology: The use of gas and liquid flow dynamics in understanding normal and pathological function.

- Genetics: The Hardy-Weinberg Law; use of probability theory in the current extensive genetic counselling given to prospective parents.

- Epidemiology: The use of models for the spread of many childhood diseases, as well as sexually transmitted diseases, has had a profound impact on strategies for containing them.

Theoretical biology has also made important contributions to evolutionary biology, population genetics, community ecology, animal breeding, and fisheries management. (With regard to fisheries

management, however, it would appear that there is a lack of robust theory that can withstand translation into the forum of applied science.) The discipline is also likely to have an effect on morphogenesis, neural network theory, and network theory as applied to the immune system. Theoretical work in neuroscience, for example, is essential for a fundamental understanding of the processes in the brain and central nervous system.

Some of the positive impacts of theoretical biology obtain from its ability to integrate diffuse information into clear patterns of knowledge, sometimes clarifying unseen relationships. "The coherence thus granted to otherwise diffuse knowledge," wrote one survey respondent, "is essential for progress in understanding and thinking about problems." Here it is important to stress the difference between theoretical biology and applied mathematics that uses biological data. The intention of the former is to discover the principles involved in self-organization and development in biological systems. The main difference between the two activities is that, in the first, conceptual frameworks dominate; in the second, mathematics takes precedence. But the benefits of theoretical biology will be attenuated if theory becomes too complex mathematically and therefore inaccessible to biologists. If this happens, the possibility of dialogue between experimentalists and theoreticians will decrease. Already some of the journals devoted to theoretical biology have become forums for exercises in mathematics rather than explorations in biology.

To sum up, the potential contribution of theoretical biology is practically limitless. One respondent to the questionnaire put it this way:

> In a large sense, I believe that the impact of theory, not only on biology and its associated technologies (for example, medicine, agriculture, animal husbandry, as well as engineering and production technologies) but on physics and the human sciences as well, will be utterly revolutionary and incalculable. This will be true both in the practical (technical or problem-solving) realm as well as -- and especially -- in the conceptual realm, where it will change the very way we perceive the world as a whole.

II. CONDUCTING RESEARCH IN THEORETICAL BIOLOGY

Impediments to Research

The factors most frequently mentioned by respondents to the questionnaire as restricting research efforts were insufficient time and inadequate funding for research. These factors are closely related. In the past several years real levels of financing in several provinces and universities have decreased while enrolments have grown. The result has been increased teaching loads for faculty and erosion of the effective levels of research grants. Researchers are using larger portions of their grants to pay for the indirect costs of research, costs that were formerly provided for in university operating budgets. Thus, for many university researchers, maintaining desirable levels of research and supporting the work of graduate students have become difficult endeavours. This situation is not unique to workers in theoretical biology; indeed, it is probably the most pressing problem facing Canadian university researchers in most fields.

Funding for theoretical biology in particular, as opposed to experimental data gathering is, by most accounts, too low. A lack of funds for travel to conferences and inadequate access to computing facilities reflect the overall shortage of research funding and further restrict researchers. Theoreticians whose research involves modelling and simulation of biological systems, including interfacing with experimental data in the generation of new models for experimental design, may require large amounts of computer time and assistance from computer specialists. Access to computational resources in many universities has been reduced or restricted in response to tighter operating budgets, thus hampering some researchers' work in theoretical biology.

A shortage of qualified graduate students with appropriate mathematical skills is also an important limiting factor. This situation reflects the inadequate training in mathematics given to most undergraduates in biology. The root of the problem may lie in the way biology is often taught in secondary schools -- as a nonmathematical science involving observation and description, rather than as a science governed by unifying concepts and principles. By contrast, physics and chemistry courses emphasize the mathematical basis of universal laws. Thus students who have mathematical abilities and acuity in understanding abstract concepts usually choose chemistry or physics over biology as a discipline to pursue in university. Several of the respondents mentioned the inadequacy of their own mathematical skills as factors restricting their work, highlighting the frequent observation that work in theoretical biology is difficult and often relies on a mix of skills and knowledge that are not easily acquired.

Peer recognition of the importance of theory in biological research, and departmental support for theoretical work appear to be lacking. There seems to be little

appreciation of theorists among rank and file biologists. The lack of collaboration among theoreticians is a serious problem, one consequence of which is the scant support given researchers in the form of disinterested and well-informed peer comment. Collaboration suffers in part because of the chauvinism university scientists display toward those outside the universities. Improving this attitude can be an important step toward improving the state of theoretical biology research in Canada. Other restrictive factors include inadequate attention to theoretical and mathematical considerations in biological journals and publications, and inadequate library resources.

Factors Promoting Research

Factors aiding research in theoretical biology include:

- collaboration with good colleagues, including experimentalists and clinicians;
- support for research provided by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERCC) and the Medical Research Council of Canada (MRCC);
- the high quality of students in graduate studies;
- departmental support, which includes the freedom to pursue theoretical work;
- access to more powerful computers;
- new developments in software.

Collaboration between theoreticians and experimentalists is often difficult to achieve but is a prerequisite for the meaningful development of theory. The rapid accumulation of empirical data requires the organization and coherence that theoretical approaches provide. Likewise, theoreticians require feedback from experimental work in order to test the validity of their theories and models. Most collaboration now seems to be carried out informally with one or two colleagues. Few groups or teams of researchers can be found that function together in a so-called critical mass. This fact highlights the importance of meetings or workshops for the exchange of ideas. Access to these meetings is regarded as important to the development of theoretical approaches to biological problems.

Access to computers and the availability of appropriate software are important to researchers, especially to systems modellers who use computers for work that is both experimental and theoretical. Researchers involved in more formal theory and abstract biomathematics, however, may not require computing or associated experimental work.

Funding for Research in Theoretical Biology

The development and maintenance of a sound base of theoretical research in biology in Canada depends on the availability of adequate funds to support research proposals of merit and the training of graduate students. Most of the direct costs of research and research manpower training in the universities are paid for by research grants awarded to individual faculty members or teams of researchers on the basis of merit determined by peer review of research proposals.

To determine the appropriateness and effectiveness of present methods of awarding research funds for theoretical biology, respondents were asked about their own research funding, whether they had experienced problems in obtaining grants for theoretical research, and whether they had any suggestions to make for improving the way the granting system works. Less than half the respondents indicated that their funding was adequate. The remainder said that more money was needed to support graduate students and postdoctoral fellows, thereby permitting an acceptable level of research activity.

Financial problems are certainly not unique to theoretical biology: in any group of scientists there will always be some who will complain of being underfunded in their work. Many of the scientists surveyed, however, had difficulty in obtaining grants for specifically theoretical work. Most funding for research is provided on the basis of the quality of the research proposal and the performance record of the researcher. But the objectives of research in theoretical biology are often vague at the outset;

methodologies are frequently unconventional (standard empirical methodologies are inappropriate for some theoretical work) and may need to be repeatedly revised in mid course; and predicting what is going to emerge from the investigation is difficult or impossible. One researcher who responded to the questionnaire argued that "If you can describe a theoretical project in detail, you've already done it."

Because theoretical work may or may not produce useful results in a given year, assessments that focus on individual researchers' productivity may put them at a disadvantage. As well, some researchers feel that the empirical bias of the granting committees colours their assessment of theoretical research proposals. Several respondents said they would not apply for funds for pure theoretical work, believing that funds would not be made available to them. "I have never dared to base an application on pure theory -- I wouldn't expect it to be funded," wrote one researcher. Typically, scientists indicated that their theoretical work would either be allied with a requisite amount of data gathering, or would be performed during time borrowed from funded experimental work.

According to some researchers, research proposals in theoretical biology are not receiving a fair assessment because reviewers on the granting committees are incapable of judging the relevance and quality (if any) of proposals involving theoretical biology. The interdisciplinary nature of much of the work in theoretical biology makes peer evaluation on the relevant granting committees difficult, and there is a distinct feeling among some researchers that existing committees composed of specialists from traditional disciplines are unsympathetic to interdisciplinary approaches. As one researcher put it, "Referees on the mathematical panel think the project is not mathematical enough; referees on the biological panel think it is not biological enough." Researchers have proposed the creation of a theoretical biology committee or a mathematical biology committee, both of which might be subcommittees of any interdisciplinary committee and would have the goal of acquiring more direct funding for interdisciplinary research involving mathematical or theoretical components.

Other proposals made by researchers for improving the situation include the following:

- that the granting councils issue policy statements to announce their readiness to consider more theoretical research in biology and to encourage experimentalists to avail themselves of theoretical methodology in the design of experiments and the interpretation of data;
- that more people with broad theoretical experience be appointed to existing granting committees to counter the committees' tendency to withold support from work not encompassed by the expertise of their individual members;
- that more young researchers be appointed to granting committees so that innovation might be more favourably received;
- that special committees be set up to deal with theoretical proposals requiring interdisciplinary work;
- that theoretical biologists be permitted to request funds for photocopying, books, computing expenses, long distance telephone calls, travel expenses for specialized conferences or workshops, and the purchase of mini- or microcomputers where needed.

Several respondents felt that on balance the granting councils were doing a good job, given the thankless work of the peer-review committees. It seems worth quoting one of the respondents on this matter: "As nearly as I can gather, NSERC functions quite well, given the inevitable human limitations. I am very strongly against any attempt to fund theoretical biology, or any other discipline, just because it is this or that discipline. Funding should be done purely on the basis of quality."

Academic Programs

There are few courses specifically devoted to theoretical biology. Those described below are typical of the ones that are available.

"Introduction to Biophysics" is taught by Professor Geoffrey Hoffmann at the University of British Columbia. The course is taken by a mixture of undergraduate and graduate physics students and includes topics such as morphogenesis, immune system network theory, and theories concerning the origin of life. The course is described as an "introduction for physicists (negligible background in biology is assumed) to the basics of molecular biology, followed by selected examples where insights from physics and mathematics have helped solve important biological problems."

At the University of Toronto, professors Charles J. Lumsden, L.E.H. Trainor, and Melvin Silverman give a course entitled "Physical Theory in Biology: An Interdisciplinary Course." The course is offered as a final year option for physics majors. The following description of the course appeared in the American Journal of Physics:

> The perspective developed is that of the theoretical physicist looking at biology and that of the life scientist looking at physics, seeking connections. Ideas move from specific biologic problems to biologic concepts, to questions of underlying physical and mathematical order, to the challenge of theory and model building. Select problems at the forefront of modern biology are studied in depth. Background in the life sciences (assumed negligible at the outset) is developed in parallel with the study of interactions between theoretical physics and biology.[1]

As a result of this course, says the university's calendar, "students with no background in biology emerge with considerable biological knowledge integrated into the language of theoretical physics. Many of the students then go on to do graduate work in theoretical biology in the physics department."

The University of Guelph offers a number of biophysics courses, including one entitled "Theoretical Biophysics." The university's calendar explains that the course is devoted to "applications of theoretical physics and mathematics to several areas of biophysics." A course entitled "Biomathematics" is given in the mathematics department and deals with "development, analysis and interpretation of mathematical models of biological phenomena. Emphasis will be on deterministic, discrete, and continuous models." The university also offers graduate courses in biomathematics. At Dalhousie University there are elementary modelling courses and seminars in biophysics that deal with selected topics close to theoretical biology. There are informal graduate courses in the biomathematics program. Still, according to Professor Robert Rosen of Dalhousie, there is insufficient focus on theoretical biology.

Professor Leon Glass teaches a course at McGill University called "Mathematical Models in Biology" to a class of approximately 30 students in the second year of university. The prerequisite is one year of calculus. Professor Glass covers topics in ecology, physiology, and cellular biology. In his reply to the questionnaire, Professor Glass explained that the "emphasis [in the course] is on finite difference equations,... graphical methods, and stability theory. Such a course (in my view) should be part of the training of biology students....More advanced courses would be desirable, but have not worked out as well at McGill."

Finally, at Queen's University in Kingston a one-term biology course is offered jointly by the departments of biology and mathematics. The following description of the course appeared in the newsletter, "Theoretical Biology in Canada":

> Under a theme of biological stability, the topics covered include single- and multi-variable stability analysis for continuous and discrete time, La Grange multipliers, and ESS [Evolutionary Stable Strategies] analysis. There is no text; handouts and library reserve material are used extensively.[2]

The appearance of textbooks is often an indication of the intellectual maturity of a "discipline" and also a sign foretelling the appearance of appropriate institutions. Among the textbooks available to students of

theoretical biology is Modeling Dynamics Phenomena in Molecular and Cellular Biology (L.A. Segel, Cambridge University Press, 1984), which appears to cover topics similar to those dealt with in the course taught by Professor Glass. A multiauthor undergraduate text for biology students in Quebec on mathematical approaches to biology (from N. Lacroix, Université Laval, one of the coauthors) is in preparation. C. Jeffries (consultant) and G. Merriam (Carleton University) are coauthors of A Workshop in Mathematical Modelling for Students of Ecology.

What can be done to prepare students for work in theoretical biology? Clearly, undergraduate biology students should be given more courses in mathematics -- courses that they normally would not take. More biological examples could be introduced into undergraduate mathematics courses, especially calculus, to replace the exclusively physics or engineering examples. Students should also take physics and physical chemistry courses, in addition to mathematics, as well as special courses in mathematical topics in biology, biophysical aspects of biology, and theory and biology. The notion should be dispelled in secondary schools that biology has little to do with physics and mathematics. Teachers might supply students with microcomputers that would enable them to play with simple mathematical models (even in secondary schools). More rigorous and more complex models could be introduced as the mathematical sophistication of the students (and teachers) progresses. Instead of simply training people to become gadgeteers and data collecters, biology courses could be broadened to include concepts from the philosophy of science. The efficacy of these measures will have to be tested over time, of course. In one experiment, the introduction of theoretical biology into mathematics courses resulted in stormy complaints from the biology department, while the introduction of mathematics into biology courses produced little theory.

Graduate students should be made aware of the uses of mathematics in modern biological research, and adequate staff should be made available for this task. Graduate courses should be offered by faculty members in their own field of interest so that students can experience how theory works in depth. Engineering and statistics courses might be appropriate prerequisites for the master's degree, as well as providing background for work at the PhD level. Theoretical biology should be given a higher profile at the graduate level, instead of being limited to background reading. Faculties could sponsor visiting speakers in theoretical biology, prepare reading lists, and circulate lists of anthologies prepared by individual instructors.

III. REFLECTIONS ON POLICY

The observations presented in this study mainly concern a portion of research in the broad field of biology and therefore make a limited contribution to any science policy for biology as a whole. Nevertheless, in view of the central importance of theoretical developments for biology, biologists in general should become aware of policy developments that affect theoretical biology. Theoretical biologists have serious and pressing questions concerning the practice of their research that require both reflection and action; many of them are participating in the ongoing process of policy generation. The benefits of that process are already apparent. It is worth noting, for example, that theoretical biology -- which includes so-called mathematical biology -- is definitely established in Canada today, which was not the case in 1971. A Science Council background study on the whole field of biology observed that

> systems and theoretical biology is similarly new and dynamic....In many of the relevant areas of applied mathematics, Canada is well behind....In general, Canadian users of mathematics in biology are disturbingly few in relation to the opportunities. As in the case of cellular and molecular biology, we need specialists in the fields of mathematical biology, if only to keep abreast of the increasingly complex techniques and the intellectual depths of the science of the future.[1]

The present study bears witness to the active role of theoretical biology in contemporary Canadian science. But those involved in creating theoretical biology are finding policy support to be somewhat diffuse and less effective than it might be. It seems appropriate to end this brief examination of the health of theoretical biology with some reflections on certain components of what may be called an ongoing policy-stimulating process, which is at this stage mainly engaged in by researchers themselves. There are three components that deserve emphasis in these reflections: communication and collaboration between experimentalists and theoreticians; the formation of an association or society of theoretical biologists in Canada; and, of course, levels and mechanisms of research funding.

Communication and Collaboration between Experimental and Theoretical Biologists

Theoretical biology has developed in relative isolation during the last decade or so, a fact much regretted by theoreticians. The lack of communication between experimentalists and theoreticians was a constant preoccupation of the workshop participants. In the responses to the survey questionnaire, this communications gap was cited as the eighth most important factor restricting research in theory. Successful communication between theorists and experimentalists, on the other hand, appeared in first place on researchers' lists of factors aiding research.

Theorists form a small proportion of the biology community, but their research work has wide ramifications. The same might be said about theoretical chemists or theoretical physicists. In the latter case, the relationship between theoreticians and experimentalists is closer, partly because the accompanying mathematics seems to be more readily absorbed, and partly because extensive theory is required both to design and interpret experiments. Theory and experiment make a nearly undivided whole. As well, the conceptual developments are more uniform, at least until a major shift of paradigm occurs. (Some Canadian theoretical biologists are working in areas likely to witness the appearance of such paradigm shifts; two of these areas are developmental biology and the application of nonlinear dynamics to a range of problems, including clinical problems.) Mathematical techniques are being applied to biology by researchers from mathematics, chemistry, and physics, and these researchers may find it difficult to make connections with and for biologists. There appears to be a definite need to establish a nexus between theorists and experimentalists such that the mathematics specialists learn the relevant biology, and biologist. practise the appropriate mathematics. This is not an easy task, but it ought nevertheless to be attempted as part of a series of policy initiatives.

How could such a nexus come into existence in Canada? If conditions are appropriate, a spontaneous ordering may occur. The situation is not at equilibrium, but it is not inherently unstable, either; it should be possible to find a new point of stability beyond the present pattern of isolation.

Raising the level of awareness of those directly concerned with theoretical biology is a precondition for progress. The exotic mathematical language spoken by many theoreticians appears to block such awareness. If so, other languages must be found. It might help to recall that theoretical biologists use not only mathematical models and simulations in their research, but also ideas, concepts, and principles. There are those among them that seek conceptual structures that capture, as it were, biological phenomena in mental nets and, what is even more important, suggest new avenues of exploration for empiricists. Empiricists could share their close experience of living organisms with theorists in a beneficial mutual exchange. The experimentalists often have theories or explanatory concepts of their own that guide their investigations. The language available to theorists and experimentalists alike is the evolving set of ideas, concepts, and principles that guides and gives meaning to their work.

An alternative measure is suggested by the field of dynamics -- a powerful conceptual tool common to several fields of science. I am not suggesting that everyone should rush out and study dynamics (although that might help to produce a new kind of awareness of complex systems); rather, I am drawing attention to a remarkable collection of illustrated books on dynamics called The Visual Mathematics Library, which was created by Ralph Abraham and Christopher Shaw. "All [of the books in the series] are written for a general audience, without the assumption of previous training in math or the sciences," say the authors.[2] There is no mathematics as such, apart from visual mathematics, in the books; the visual mathematics is in the form of graphs and drawings, and these are so well executed and so well illustrated that one can acquire from them a good working knowledge of nonlinear dynamics and its application to many fields. This is one example of an alternative language. There may well be others that are available to those interested in core research, ways of communicating that help make the mathematical barrier less opaque. New user-friendly software may give experimentalists hands-on experience in simulation and modelling. Today there is some question as to whether computers involve techniques for theorists or for experimentalists -- a useful ambiguity. Computers can be used by experimentalists and theorists alike to probe complex systems, whether these be galaxies, or cell membranes, or mathematical models.

Another suggestion involves special joint workshops that could be held from time to time. These would be special in the sense that one of their objectives would be to

reveal the links between theory and experiment in a manner that was accessible to all participants. Specialization should not present a problem, but if it did, the presentations could be kept general at first. Or, if specialization could not be avoided, the presentation of ideas and concepts relevant to various subfields might be emphasized. Publication of workshop proceedings could follow. Eventually, a publication devoted to such presentations might emerge, or perhaps one or two intellectual newsletters that would circulate throughout the community of biologists, landing as well on the desks of physicists, chemists, and mathematicians, all of whom would participate on an equal footing with theorists in making a theoretical structure for the understanding of living systems.

These policy elements -- emphasis on conceptual structure, finding ways of expressing mathematical ideas in accessible forms, and joint workshops for experimentalists and theoreticians -- ought to be financially supported by the granting agencies as vital to the health of biology in Canada. For their part, the various organizations of biologists, and perhaps those of other disciplines as well, ought to play an active role in fostering communication and collaboration between empirical and theoretical scientists. Little effort is needed to imagine the creation of a Canadian institute for theoretical biology devoted both to theory and to promoting contacts and exchanges with other disciplines. The strong recommendation made by the workshop* participants to constitute a society of theoretical biologists in Canada is significant in light of the above reflections.

The Canadian Society for Theoretical Biology

A conference aimed at launching a Canadian society of theoretical biolgists is to be held in Montreal in June 1985. It is premature to say anything specific about the Canadian Society for Theoretical Biology, especially about its form and the mandate its members will give themselves. However, the very existence of such a society is important. Its appearance sends a distinct signal from theoretical biologists to Canadian policy makers that the discipline of theoretical biology is here to stay.

The society will no doubt have three related functions. First, it will serve to keep theoretical biologists in touch with one another. This is in itself an important consideration when so many different specialties are involved. Collaboration among theorists can be fostered by such an organization; at the very least the sense of isolation, never very helpful, might be reduced. Questions of university courses and seminars in theoretical biology could be discussed fruitfully. A spin-off of this network-forming activity might be the production of a printed document containing summaries or expositions that all can read and assimilate. The society could help set up a computer network, one that could be used for visualizing mathematical structures. So the first function of the society might be to foster interior dialogue and the exchange of ideas.

Second, the organization would stimulate and maintain exterior dialogue, especially dialogue with experimental biologists. The publication envisaged earlier might supply the vehicle for these conversations. Real dialogue requires an effective medium: a meeting, a workshop, or a publication of some description. A society for theoretical biology could play a leading role in each of these activities.

Third (and the reader should bear in mind that this list is not a ranking), the society would be able to monitor and advise researchers on proper research funding procedures. It could also engage in conversations with granting agencies with the objective of bringing about fairer and more informed consideration of research proposals in theoretical biology.

---

* As noted earlier, this paper is based in large measure on the results of the Workshop on Theoretical Biology, which was held in Ottawa on 25 and 26 November 1983. The workshop was cosponsored by the Science Council of Canada and the National Research Council of Canada.

Research Funding

A majority of respondents in the survey reported that more money was needed to maintain a good level of research activity. This desired level of research activity depends to a significant extent on the presence and participation of postdoctoral fellows and graduate students. As noted earlier, the level of grants does not appear to be high enough to permit researchers to support an adequate number of graduate assistants. Some people may not see this as a serious problem, but it is. Because of the inadequacies of the present granting mechanisms, many researchers in theoretical biology do not request money directly for theoretical projects, preferring to combine such projects with other experimental or theoretical work for which funding is more readily available. An association of theoretical biologists could make it easier for researchers to apply for funds for specifically theoretical work. It could provide knowledge and experience to the granting agencies, and so perhaps change the level of awareness of its committee members concerning the needs of theoretical biologists. In the United States grants in the biophysical sciences area are administered by the National Institutes of Health through the customary committees. But for unusual grant applications that "fall between the cracks," ad hoc committees are drawn from a pool of experts in a spectrum of fields, from mathematics to clinical medicine.[3] A Canadian Society for Theoretical Biology could supply the granting agencies with the names of individuals qualified to sit on such ad hoc committees, a service that those working hard on grant selection committees would no doubt appreciate. A richer dialogue between experimentalists and theoreticians is also important here, inasmuch as experimentalists predominate on the four NSERC biology grant selection committees. (Something to think about: theoretical biology is being supported by nine NSERC grant selection committees, in addition to receiving support from MRC and other sources.)

All that has been said so far must be considered in the context of federal and provincial cuts to higher education, with their attendant impact upon research. There appears to be a crisis of unknown proportions developing that will affect most areas of university research, and the problems of doing work in theoretical biology are part of this total picture.

To end on a positive note, let me say that the community of Canadian theoretical biologists exhibits all the energy and enthusiasm necessary to face the challenge of multidisciplinary research on the immensely subtle frontiers of life itself.

APPENDIX 1: AGENDA FOR THE WORKSHOP ON THEORETICAL BIOLOGY*

Friday, 25 November, Morning: Opening Remarks

0900 Dr Claude T. Bishop
Director, Division of Biology Sciences
National Research Council of Canada

and
Dr James M. Gilmour
Director of Research
Science Council of Canada

IMPACT OF THEORY IN BIOLOGY

Chairman: Dr Raymond L. Somorjai
Division of Chemistry
National Research Council of Canada

0915 Introductory Remarks

Dr Colin W. Clark
Acting Director
Institute of Applied Mathematics and Statistics
The University of British Columbia

0930-1230 Discussion

1230 Luncheon

Friday, 25 November, Afternoon: EXCHANGE OF IDEAS IN CURRENT RESEARCH

Chairman: Dr Michael Zuker
Division of Biological Sciences
National Research Council of Canada

1430-1730 Exchange and Discussion

Saturday, 26 November, Morning: PRACTICAL QUESTIONS AND POLICY

Chairman: Dr Paul J. Buckley
Science Council of Canada

0900-1200 Discussion

* Held in Ottawa, 25-26 November 1983.

APPENDIX 2: LIST OF WORKSHOP PARTICIPANTS

Dr P. Antonelli, Department of Mathematics, University of Alberta

Dr C.W. Clark, Institute of Applied Mathematics, University of British Columbia

Dr J. Dainty, Department of Botany, University of Toronto

Dr J.R. Derome, Département de Physique, Université de Montréal

Dr L. Glass, Department of Physiology, McGill University

Dr B. Goodwin, U.K. Visitor (University of Sussex)

Dr L.G. Harrison, Department of Chemistry, University of British Columbia

Dr W.G.S. Hines, Department of Mathematics and Statistics, University of Guelph

Dr A.H. Louie, Consultant in Ottawa

Dr C.J. Lumsden, Faculty of Medicine, University of Toronto

Dr M.C. Mackey, Department of Physiology, McGill University

Dr R. Miura, Institute of Applied Mathematics, University of British Columbia

Dr P. Pirlot, Département des sciences biologiques, Université de Montréal

Dr R. Rosen, Department of Physiology and Biophysics, Dalhousie University

Dr D. Sankoff, Centre de recherches en mathématiques appliquées, Université de Montréal

Dr W. Silvert, Marine Ecology Division, Bedford Institute of Oceanography

Dr W.R. Smith, Department of Mathematics and Statistics, University of Guelph

Dr R.L. Somorjai, Chemistry Division, National Research Council

Dr L.E.H. Trainor, Department of Physics, University of Toronto

Dr P. Van den Driessche, Department of Mathematics, University of Victoria

Dr M. Zuker, Biology Division, National Research Council

Dr M.J. Zuckermann, Department of Physics, McGill University

APPENDIX 3: SURVEY QUESTIONNAIRE

CONFIDENTIAL

To help the Science Council of Canada better understand the current state of theoretical biology, we would appreciate your completing the following questionnaire and returning it to

Survey of Theoretical Biologists
Science Council of Canada
100 Metcalfe Street
Ottawa, Ontario
K1P 5M1

in the enclosed envelope.

0. Name

1. Education

GRADUATE STUDIES

. University

. Country

. Major area of interest

. Years since last degree

2. Professional Situation

. Position

. Institution

. Proportion of time for research:
1/4 1/2 3/4 1

. Proportion of research time for theoretical biology:
1/4 1/2 3/4 1

. Proportion of research time collaborating with theoretical biologists:
1/4 1/2 3/4 1

. Proportion of research time collaborating with other biologists:
1/4 1/2 3/4 1

3. Indicate number of postdoctoral fellows and graduate students engaged in research with you.

Indicate basic discipline of fellows and students.

Indicate current field or employment for previous fellows and students.

4. Research interests in theoretical biology. (Brief description; one or two recent publications or references).

5. Factors restricting your research efforts in theoretical biology.

6. Factors aiding your research efforts in theoretical biology.

7. Funding:

Indicate principal sources and levels of research funding: (NSERC, MRC, other).

Is your current level of funding adequate?

Are you familiar with NSERC or MRC granting procedures as they apply to your research?

Outline any problems experienced in obtaining grants for theoretical biology.

Have you any suggestions for improving current granting procedures?

8. Outline your perception of the impact of theoretical biology on basic and applied biology and related disciplines.

9. Outline suggestions for introducing theoretical biology into biology programs at undergraduate and graduate levels.

APPENDIX 4: SOME RESULTS FROM THE SURVEY

1. Respondents were asked to report sources and levels of funding for work in theoretical biology. (As discussed, some researchers are able to finance theoretical work by also doing experimental work that may be more easily funded.) Total funding reported for 1982/83 by 48 respondents is $1 601 098. The major single source of funding for theoretical biology in this survey is NSERC, which has distributed $744 688 in operating grants to individuals, and $288 000 in the form of team, equipment, or strategic grants. The average NSERC operating grant for theoretical biology is $23 271. The MRC financed five projects in theoretical biology for a total of $148 000. Finally, other sources contributed $429 430. Included here are two grants from the Department of Fisheries and Oceans, internal university sources, provincial grants and foundations. In addition, five respondents work in the Department of Fisheries and oceans; their financing is not included in the above figures.

2. Twenty-two grants were awarded by NSERC's four biology grant selection committees: population biology (12); animal biology (6); cell biology and genetics (3); plant biology (1). This rapresents roughly 65 per cent of the total number of NSERC grants cited. The remaining 35 per cent was distributed as follows: pure and applied mathematics (5); interdisciplinary (4); physics (1); statistics (1); computing and information science (1).

3. One of the questions asked researchers how much time they were able to devote to theoretical biology. The results indicate that 74 per cent of respondents spend at least 50 per cent of their research time on theoretical biology. Thirty-six per cent of respondents spend at least 75 per cent of their research time on theoretical biology.

4. The 48 respondents reported working with 27 postdoctoral fellows and 89 graduate students.

5. Of 44 scientists reporting, about half did their graduate training in the United States, 16 trained in Canada, and 6 trained in other countries.

6. Research results appeared in 35 publications. Here is a partial list of titles:

   Theoretical Population Biology
   Journal of Theoretical Biology
   Theoretical Applied Genetics
   Evolutionary Theory
   Progress in Theoretical Biology
   Bulletin of Mathematical Biology
   Mathematical Biosciences
   Proceedings of the Royal Society
   Annual Review of Physical Chemistry
   Foundations of Physics
   Journal of Molecular Biology
   Systematic Zoology
   Canadian Journal of Zoology
   American Journal of Physiology
   North American Journal of Fish Management
   Acta Biotheoretica
   Journal of Mathematical Biology
   Journal of Inferential and Deductive Biology (forthcoming)

7. Respondents made several interesting comments on matters related to research in theoretical biology. Here is a sampling of them:

   > Theoretical biology is just about the only way to study more than one idea at a time.

   > [We need to] establish some links between the mathematics and biology communities; [representatives of the two communities could then] propose how grants may be shared from those two sources....

   > I think biology will always remain a less quantitative science than, say, physics. But I think that theoretical biology will have an increasing importance and acceptance as time passes.

The most important thing is that the constituency or market for theoretical and mathematical approaches to biological systems is growing very rapidly now. Thus the intellectual climate in the biological sciences, particularly among the younger generation of researchers, is generally friendly and rich.

The paradigms of theoretical ecology underlie all of the present thinking and experimental work in biological oceanography. Biologists literally cannot think of possible explanations for their observations if those explanations fall outside the Lotka-Volterra logistic growth and competition framework.

NOTES

Preface

1. Comment made by a participant at the workshop on theoretical biology, held in Ottawa, 25-26 November 1983.
2. Professor Paul Pirlot, Department of Biological Sciences, University of Montreal.

II. Conducting Research in Theoretical Biology

1. Americal Journal of Physics 47 (April 1979): 302.
2. "Theoretical Biology/Canada," no. 2 (January 1985): 5. (Prepared by Michael C. Mackey, Department of Physiology, McGill University.)

III. Reflections on Policy

1. P.A. Larkin, and W.J.D. Stephen, From Formalin to Fortran: Basic Biology in Canada. Science Council Background Study 18 (Ottawa: Information Canada, 1971): 25-26.
2. Ralph H. Abraham and Christopher D. Shaw, Dynamics: The Geometry of Behavior. Part 1: Periodic Behavior (Santa Cruz, California: Aerial Press Inc., 1981): jacket notes.
3. M.C. Mackey (Professor of Physiology, McGill University), private communication.

Conseil des sciences du Canada
Science Council of Canada

Document d'étude

Des idées bien vivantes - La biologie théorique au Canada

Paul J. Buckley

DES IDEES BIEN VIVANTES
La biologie théorique au Canada

Document d'étude
de Paul J. Buckley

Mai 1985

Les documents d'étude sont des documents de travail que le Conseil des sciences du Canada met à la disposition des personnes ou groupes intéressés, en quantité limitée, pour connaître leurs réactions.

Les vues exprimées dans le présent document sont celles de l'auteur; elles ne reflètent pas nécessairement l'opinion du Conseil des sciences du Canada.

Vous pouvez vous procurer gratuitement des exemplaires de :

Des idées bien vivantes -- La biologie théorique au Canada

auprès du :

Service des publications
Conseil des sciences du Canada
100, rue Metcalfe
Ottawa (Ontario)
K1P 5M1

Copies of
Ideas Alive: Theoretical Biology in Canada
are also available free of charge

©Ministre des Approvisionnements et Services, 1985

N° de catalogue SS21-5/1985-2F
ISBN 0-662-93161-0

TABLE DES MATIERES

Avant-propos 5

Préface 7

Remerciements 9

I. Le contexte de la recherche en biologie théorique 11

Les mathématiques, la théorie et la biologie 11
Les sujets de recherche d'intérêt 12
L'impact de la théorie 12

II. La recherche en biologie théorique 17

Les obstacles à la recherche 17
Les facteurs favorisant la recherche 18
Le financement de la recherche 18
Les programmes universitaires 20

III. Réflexions sur les orientations à prendre 23

La communication et la collaboration entre les spécialistes en biologie expérimentale et les spécialistes en biologie théorique 23
La société canadienne de biologie théorique 25
Le financement de la recherche 26

Annexe 1. Ordre du jour de l'atelier sur la biologie théorique 27

Annexe 2. Liste des participants à l'atelier 28
Annexe 3. Questionnaire du sondage 29
Annexe 4. Quelques résultats du sondage 31

Notes 33

I. AVANT-PROPOS

La biologie théorique, telle que je la conçois, peut s'appliquer à plus d'un niveau distinct. Pour beaucoup cependant, elle s'attache essentiellement à construire et à vérifier des modèles spécifiques de systèmes et de comportements biologiques particuliers. Malgré la réticence des spécialistes en biologie expérimentale à accepter la théorie en général, la modélisation est considérée de plus en plus, bien que de mauvaise grâce, comme une méthode indispensable.

Outre des modèles particuliers de systèmes biologiques, on peut étudier des catégories de modèles possédant des propriétés communes et constituant les modèles possibles de quelque système réel. L'étude des réseaux neuraux et celle des équations réaction-diffusion, qui est très en vogue aujourd'hui, en fournissent des exemples. Je me plais à qualifier ces méthodes de métaphoriques, car elles ne se restreignent pas à un système ou à un comportement biologique en particulier mais visent toute une catégorie de systèmes ou de comportements; elles peuvent porter par exemple sur l'évolution, la croissance, le développement, la différenciation, voire la nature de la vie en général. On peut même aller plus loin et étudier des catégories de catégories de modèles possibles, et les relations entre ces catégories. Ce n'est d'ailleurs qu'à ce niveau que peuvent être vérifiés les principes du réductionnisme.

Lorsque j'étais aux études supérieures, il y a moins de 30 ans, il m'était facile de connaître tous les spécialistes en biologie théorique ou mathématique. Aujourd'hui, ce n'est plus possible, car il y en a pour ainsi dire des milliers. A cette époque, une seule revue traitait de ce sujet en général tandis qu'aujourd'hui, il y a en peut-être entre une demi-douzaine et une douzaine, en plus d'une autre douzaine se spécialisant dans certains aspects. Même les revues dites expérimentales acceptent d'examiner et de publier des manuscrits dont l'élément central est théorique. Il n'en reste pas moins qu'il y a plus d'articles à publier que d'éditeurs. Ainsi, pour donner un exemple de cette expansion qui m'est très familier, le Journal of Theoretical Biology, publication trimestrielle à ses débuts, est maintenant bihebdomadaire, et ses rédacteurs refusent environ 70 pour cent des manuscrits, faute d'espace notamment.

Cette effervescence est principalement le produit d'un mouvement massif de scientifiques de disciplines plus quantitatives vers la biologie. Physiciens, mathématiciens, ingénieurs, statisticiens et spécialistes d'autres domaines s'intéressent en effet de plus en plus aux problèmes biologiques, des plus appliqués aux plus ésotériques. Un afflux semblable de spécialistes en physique expérimentale vers la biologie est survenu au moment où la biologie moléculaire a fait son apparition.

En dépit de fortes pressions inhibitrices, la biologie théorique connaît un

développement remarquable. Elle s'impose résolument dans chaque facette de la recherche biomédicale et à chaque niveau de l'organisation biologique. Cette incursion, sans être tenue pour miraculeuse, n'en est pas moins phénoménale.

Robert Rosen
Département de physiologie
et de biophysique
Université Dalhousie
Halifax

PREFACE

> La biologie théorique vit des moments grisants. Des révolutions importantes susceptibles de susciter le développement de la théorie pointent à l'horizon. C'est le temps pour le Canada de saisir l'occasion de favoriser l'essor d'une discipline encore jeune mais très importante.[1]

La biologie théorique doit ses progrès récents à l'apport conjugué de disciplines diverses telles que la biologie, la physique, la chimie, les mathématiques, la physiologie et la médecine. Elle constitue en quelque sorte le point de convergence de ces disciplines de base, qui s'intéressent au développement des mathématiques et à la formulation d'idées et de concepts utiles à la biologie -- science que nous avons associée jusqu'ici à la taxonomie. Petit à petit, en biologie, on assiste à un changement de paradigme : l'explication prend le pas sur la description. Ce phénomène récent présente un parallèle avec celui qui s'est produit en chimie et en physique, domaines où la théorie et l'expérimentation sont maintenant étroitement liées. (L'interrelation n'est toutefois encore que partielle en biologie.)

La présente étude s'inspire du sentiment qui anime les praticiens de la biologie théorique : pour eux, le travail qu'ils accomplissent est enrichissant, distinct et progressif, et il laisse entrevoir une percée prochaine dans certains domaines. Elle a vu le jour suite à une enquête factuelle sur la recherche fondamentale au Canada, que l'auteur a menée fin 1982 début 1983 et au cours de laquelle il a rencontré 33 physiciens, chimistes, biologistes et mathématiciens rattachés à neuf universités canadiennes dans le but d'obtenir un échantillon des recherches réalisées par ces scientifiques et surtout de connaître les difficultés communes que ceux-ci avaient rencontrées. (En politique scientifique, cette étude exploratoire se définit habituellement comme l'étude de la santé d'une science.) Plusieurs des points soulevés pendant l'enquête se retrouvent dans la présente étude, mais je tiens à souligner qu'un des scientifiques interrogés, un biologiste[2], a fait valoir la nécessité de faire le point sur la biologie théorique au Canada, car cette science avait été quelque peu délaissée. Selon lui -- et plusieurs autres personnes ont soutenu cette affirmation --, la pratique de la biologie théorique semblait poser des difficultés.

J'ai pu constater qu'il s'agissait d'une discipline importante méritant une attention particulière. D'abord, la théorie de la biologie est en train de se définir sur une base pluridisciplinaire, et c'est là un progrès notable de la science contemporaine. Ensuite, on soutient qu'elle participe au moins autant que l'expérimentation aux décisions concernant la forme et le contenu de la biologie en tant que science. Enfin, les progrès théoriques ont trouvé des applications pratiques importantes en écologie,

en gestion des pêches, en physiologie clinique, en neurophysiologie et dans d'autres domaines. Le chapitre I renferme quelques exemples de projets de recherche en cours en biologie théorique.

L'auteur a jugé à propos de tenir un atelier sur le sujet, idée qu'ont corroborée une douzaine de théoriciens de la biologie. Ainsi s'est constitué en novembre 1983, à Ottawa, un atelier parrainé par le Conseil national de recherches et le Conseil des sciences et auquel ont participé 22 scientifiques de diverses disciplines. Ceux-ci ont recommandé, entre autres, que le Conseil des sciences entreprenne une étude de la biologie théorique au Canada. Le Conseil des sciences ayant approuvé cette recommandation, le présent document a vu le jour.

Il s'agissait, au cours de l'atelier, d'examiner la configuration actuelle de la recherche en biologie théorique en tentant d'envisager celle qui serait souhaitable, de faire le bilan des enquêtes en cours au Canada et d'étudier certaines questions de fond connexes. L'ordre du jour de l'atelier figure à l'annexe 1, et la liste des participants est fournie à l'annexe 2. Les spécialistes en biologie théorique participants appartenaient au gouvernement ou à divers départements universitaires : botanique, biologie, chimie, physique, mathématiques, physiologie et médecine*. Etaient aussi représentés le laboratoire d'écologie marine du Bedford Institute of Oceanography et deux divisions du Conseil national de recherches, soit celles de chimie et de biologie. Sur le plan des politiques, il en est ressorti principalement une résolution visant à former une véritable entité de spécialistes en biologie théorique -- processus d'ailleurs déjà amorcé.

Pour tracer un profil des domaines de recherche en biologie théorique au Canada, des chercheurs et de leurs préoccupations, on a envoyé un questionnaire à 60 chercheurs choisis au hasard (voir annexe 3). Les 48 réponses reçues nous ont permis d'esquisser un tableau des intervenants de la biologie théorique et de leurs idées sur l'avenir de leur domaine d'étude. La majorité des répondants, soient 18, étaient membres de départements de biologie, y compris la botanique, la physiologie et la zoologie; les autres chercheurs universitaires se répartissaient entre les mathématiques (10), la médecine (8), y compris la biophysique et la biochimie; la physique (2); l'océanographie (1); le génie électrique (1); et l'informatique (1). Cinq représentants de laboratoires de recherche gouvernementaux, un consultant et un ingénieur biomédical y ont aussi répondu. Quelques résultats du sondage figurent à l'annexe 4.

Les observations faites dans la présente étude s'inspirent en partie des délibérations en atelier et des réponses au questionnaire du sondage. La conclusion constitue une réflexion sur l'élaboration d'une politique scientifique en matière de biologie théorique.

Paul Buckley

---

* D'après les études préparatoires à la rédaction de ce document, 200 scientifiques effectuaient des recherches à temps partiel ou à temps plein en biologie théorique. Ce nombre ne comprend pas les étudiants de deuxième et troisième cycles ni les boursiers postdoctoraux, qui sont nombreux.

REMERCIEMENTS

Je tiens à souligner la participation de Brian Simms à la préparation et à la rédaction de ce rapport, et à témoigner ma gratitude aux spécialistes en biologie théorique suivants, qui en ont revu la version provisoire : MM. P. Antonelli, C.W. Clark, W.G.S. Hines, M.C. Mackey, R. Rosen et L.E.H. Trainor.

I. LE CONTEXTE DE LA RECHERCHE EN BIOLOGIE THEORIQUE

La biologie théorique ne se prête pas aisément à la définition, non seulement parce que ses techniques et principes fondamentaux sont à l'état embryonnaire, mais aussi parce que ses sujets et ses méthodes varient énormément. Il y a lieu néanmoins d'esquisser le contexte de la recherche en biologie théorique et de poser ainsi les jalons d'une évaluation des différents orientations possibles dans ce domaine. On examinera donc les relations entre les mathématiques, la théorie et la biologie; certains thèmes de recherche d'actualité; et l'impact de la théorie sur la biologie et les disciplines connexes.

Les mathématiques, la théorie et la biologie

Pour les spécialistes en biologie expérimentale désireux de suivre les progrès théoriques modernes en biologie, la structure mathématique de la théorie n'est pas sans poser quelque difficulté, car leur formation classique les a mal préparés à analyser les phénomènes biologiques selon la démarche mathématique souvent très complexe qui prévaut actuellement. Ils éprouvent ainsi du mal à passer d'un domaine essentiellement empirique à un autre dont les fondements empruntent davantage à la théorie. Par ailleurs, les liens qui unissent les progrès mathématiques au coeur même de la recherche biologique risquent de se rompre : autant les empiristes ont-ils du mal à maîtriser les mathématiques requises, autant les théoriciens butent-ils sur les notions biologiques. L'aspect biologique des théories doit être mis en évidence, au risque de sombrer dans la stérilité.

Il faut des années pour qu'un mathématicien acquière une certaine compétence en biologie, ce qui pose un grave problème à la biologie théorique. (En biologie comme dans bien d'autres domaines, une connaissance trop limitée peut entraîner des conséquences graves.) La biologie théorique comprend plus que des mathématiques -- elle comporte des concepts et des principes, habituellement empruntés à d'autres domaines comme la physique -- et il ne faut pas chercher à la réduire à des formules mathématiques, ni la confondre avec la biologie mathématique. Comme le faisait remarquer un répondant au sondage : "On court un autre risque en ne tenant pas compte des formes mathématiques naturelles, car celles-ci peuvent jeter de la lumière sur une multitude de données de prime abord réfractaires et leur donner de la cohérence."

On peut donc en déduire que la communication entre mathématiciens et biologistes au sujet de la théorie est souvent ardue. C'est au prix d'un effort particulier que chaque groupe doit renseigner l'autre des faits et des attitudes régnant dans son domaine. Ainsi, sans vouloir trop simplifier les mathématiques, il faut trouver des façons de communiquer les résultats de la théorie mathématique aux expérimentalistes (en chimie, nombre des résultats de la théorie des quanta sont présentés sous forme pic-

turale). Dans cette optique, la connaissance des techniques de modélisation serait particulièrement utile aux biologistes.

Il reste que, jusqu'ici, la théorie en biologie n'a pas joui d'un très grand prestige. Dans l'ensemble, la biologie au Canada demeure essentiellement pratique. "Nous appartenons à une société jeune qui accorde trop d'importance aux résultats pratiques immédiats, et pas assez aux aspects philosophiques et culturels de la science", a fait observer un des répondants. A ce propos, d'aucuns se demandent si la biologie théorique est pertinente, même pour la biologie. D'autres, dont certains spécialistes en biologie théorique, soutiennent que celle-ci est compliquée et que peu de ses recherches sont vraiment remarquables (les théories concernant la structure de l'ADN et celles, moins connues, de l'universalité de la structure des membranes font exception). Le sentiment que ce qui est théorique ne peut déboucher sur des réalisations concrètes règne parfois, même si une grande partie du savoir sur lequel s'appuie le biologiste pour concevoir et développer ses expériences est théorique. Certains expérimentalistes admettent néanmoins la contribution de la théorie et lui rendent son dû, mais il semble bien que, du moins dans l'avenir immédiat, la biologie théorique ne s'imposera comme discipline que dans la mesure où ses recherches tenteront de répondre à des questions fondamentales en biologie.

Les expérimentalistes s'attachent aux détails et aux particularités de systèmes précis, tandis que les théoriciens étudient davantage les principes unificateurs de systèmes. Il va donc sans dire que la collaboration entre les chercheurs comprenant les problèmes théoriques, et les physiciens, mathématiciens, ingénieurs et chimistes, constitue une partie essentielle de la stratégie de recherche dans plusieurs domaines de la biologie théorique. La réticence de la collectivité des chercheurs en biologie face aux nouvelles idées découle peut-être d'un manque de compréhension mutuelle des buts respectifs des théoriciens et des expérimentalistes, et d'un manque d'attention à la pertinence de la biologie dans certains travaux théoriques. Les concepts ou les théories qui appartiennent à la structure profonde des mathématiques et ne tiennent pas compte des données biologiques sont peu utiles aux biologistes et peuvent amener les expérimentalistes à dédaigner les démarches théoriques. Par ailleurs, certains biologistes croient que les mathématiciens et les autres scientifiques ne faisant pas partie de la collectivité biologique, bien qu'ils constituent un bon soutien technique, ne peuvent reconnaître le mérite de la biologie pertinente, ce qui restreint davantage la collaboration interdisciplinaire souvent nécessaire à la biologie théorique.

Les sujets de recherche d'intérêt

Le tableau 1 présente une liste de certains thèmes de recherche en biologie théorique. Ces titres, courts et descriptifs, donnent une idée de l'ampleur et de la portée des recherches qui se font actuellement au Canada dans le domaine.

L'impact de la théorie

L'impact considérable qu'a eu la biologie théorique sur la biologie fondamentale et appliquée et les disciplines connexes n'est pas reconnu ni apprécié à sa juste valeur. On fait en effet peu de cas de l'apport de la théorie, même si celle-ci, dans une certaine mesure, est à l'origine de nombreux perfectionnements au niveau des instruments, et de bien d'autres progrès technologiques. Les expérimentalistes tardent à reconnaître ses mérites parce qu'elle semble provenir en partie de la physique et de la chimie. De plus, les théories biologiques sont difficilement vérifiables : on ne peut tester des théories biologiques compliquées à l'aide de simples modèles expérimentaux, comme cela se fait pour les théories de physique, par exemple.

La théorie biologique fait progresser non seulement la technologie mais aussi la recherche biologique elle-même. Un scientifique participant au sondage l'a exprimé ainsi : "Tout travail expérimental de valeur a forcément une idée, une théorie quelconque comme fondement. Il est temps de reconnaître explicitement le rôle de la théorie et de faire valoir l'importance de la biologie théorique." Il faudrait pour cela que les théoriciens et les empiristes collaborent

Tableau 1. Sujets de recherche d'intérêt en biologie théorique

Ecologie	Evolution	Autres
Les interactions plantes/ herbivores	L'évolution dans les milieux hétérogènes	La cinétique de la fixation à des récepteurs; la pharmacocinétique
Le phénomène de l'agrégation chez les prédateurs	Le non-équilibre thermodynamique et l'évolution biologique	La structure macromoléculaire
L'écologie communautaire : la structure du réseau alimentaire; la recherche d'espèces critiques	La biochimie et l'évolution moléculaire	L'analyse phylogénétique quantitative
La structure historique des systèmes écologiques	L'évolution des comportements et de la vie	L'éthologie théorique et méthodologique
La variabilité des planctons dans l'espace et le temps	Les modèles de stratégie dans la classification et l'évolution	Les processus de transport à travers les membranes des cellules végétales
Les pêcheries à espèces multiples	Les adaptations évolutives chez les insectes	Les modèles probalistiques en biologie des populations
La persistance et le mutualisme dans les systèmes écologiques	La structure et l'évolution des génomes	Les problèmes de calcul en classification, en systématique et en taxinomie numérique
Les stratégies de récoltes optimales	Les stratégies d'évolution stable	La modélisation neurale; le contrôle neural appliqué
La stabilité qualitative des modèles d'écosystèmes	Le problème de l'origine de la vie	L'immunologie cellulaire
La théorie des niches	La modélisation mathématique de l'évolution biologique et sociale	Les effets du forçage périodique sur les oscillateurs biologiques et l'étude de leurs applications à des situations cliniques
La théorie des analyses écologiques	Les modèles mathématiques de l'évolution	La théorie des réseaux de systèmes immunitaires
La cohérence des réseaux alimentaires d'eau salée et d'eau douce	La structure conceptuelle de la théorie de l'évolution	La morphogénèse et la formation de structures dans le processus de développement

Tableau 1. Sujets de recherche d'intérêt en biologie théorique (suite)

Ecologie	Evolution	Autres
Les théories de l'utilisation des ressources	L'évolution du système génétique	La biologie des structures et du développement
La stabilité des écosystèmes	L'évolution des enzymes chez les poissons	Les biomathématiques abstraites; la théorie des catégories
La modélisation de la concurrence au niveau de l'appropriation du territoire		L'études des propriétés des systèmes dynamiques non linéaires et des bifurcations se produisant dans ces systèmes, en vue de comprendre les fonctions normales et pathophysiologiques
La modélisation mathématique des ressources renouvelables		La modélisation mathématique en neurophysiologie
		L'organisation des systèmes de comportement
		Les systèmes dynamiques discontinus (p. ex. croissance des populations)
		La théorie des systèmes complexes
		La comparaison des séquences (acides nucléiques; protéines)
		Les aspects théoriques des systèmes endocriniens
		Les modèles avec retard, le doublement des périodes et le comportement chaotique
		La méthode des champs appliquée à l'auto-organisation et au développement des structures
		Les origines et le développement du code génétique
		La biologie des populations d'organismes marins

davantage et que les grands fondements théoriques soient mis à la portée des empiristes. (On pourrait le faire par exemple en publiant des documents facilement compréhensibles et de nature générale, et en accordant une plus grande place aux mathématiques dans la formation des biologistes, même au niveau secondaire.)

Les retombées de la biologie théorique se sont manifestées dans les domaines suivants :

- Diagnostic et thérapeutique : La tomographie axiale tranverse calculée (CAT); l'électrocardiaographie; l'analyse des comportements et l'étude des médicaments; l'interprétation des tests de tolérance au glucose, etc.

- Neurophysiologie : La compréhension de l'excitabilité des neurones grâce à Hodgkin et Huxley; le modèle de contraction des muscles établi par Huxley; les modèles de transmission synaptique, etc.

- Physiologie respiratoire et cardiovasculaire : L'application de la dynamique de l'écoulement des gaz et des liquides à la compréhension des fonctions normale et pathologique.

- Génétique : La loi de Hardy-Weinberg; l'application de la théorie des probabilités au conseil génétique pour futurs parents, actuellement très répandu.

- Epidémiologie : L'application de modèles à l'étude de la transmission des maladies enfantines et des maladies sexuelles, et son impact profond sur les stratégies de lutte contre celles-ci.

En outre, la biologie évolutionnaire, la génétique des populations, l'écologie communautaire, et l'élevage et la gestion des pêches ont largement bénéficié des apports de la biologie théorique. (En ce qui concerne la gestion des pêches, toutefois, il semblerait qu'une théorie solide pouvant être transposée au monde de la science appliquée fasse défaut.) La morphogénèse, la théorie des réseaux neuraux et la théorie des réseaux appliquée au système immunitaire compteraient parmi d'autres bénéficiaires éventuels de la discipline. Par exemple, les travaux théoriques en sciences neurologiques sont indispensables à la compréhension des mécanismes du cerveau et du système nerveux central.

Certains effets positifs de la biologie théorique découlent de l'aptitude de celle-ci à intégrer des renseignements diffus dans des structures nettes de connaissance, capables parfois de clarifier des relations obscures. "La cohérence ainsi donnée à des connaissances diffuses," a commenté un répondant, "est essentielle pour faire progresser la compréhension et la réflexion." Il convient ici de souligner la différence qui existe entre la biologie théorique et les mathématiques appliquées se servant de données biologiques. La première tente de découvrir les principes régissant l'auto-organisation et le développement des systèmes biologiques. Les deux sciences se distinguent surtout en ce que les cadres conceptuels constituent l'élément dominant de la première et les mathématiques, celui des secondes. Si la théorie devenait mathématiquement trop complexe et commençait à échapper aux biologistes, la biologie théorique en souffrirait, et les possibilités de dialogue entre expérimentalistes et théoriciens s'en trouveraient réduites. Déjà certaines revues consacrées à la biologie théorique, au lieu de se faire l'écho des recherches exploratoires en biologie, sont devenues de véritables recueils d'exercices de mathématiques.

En bref, la biologie théorique a un potentiel illimité. Voici ce qu'un des répondants au questionnaire a fait observer à ce sujet :

> Dans un sens très large, je crois que l'impact de la théorie, non seulement sur la biologie et les technologies connexes (par exemple la médecine, l'agriculture, l'élevage et les technologies du génie et de la production) mais également sur la physique et les sciences humaines, sera tout à fait prodigieux et révolutionnaire. Cela sera vrai d'un point de

vue pratique (technique ou pour la solution de problèmes), mais surtout d'un point de vue conceptuel, car la façon même dont nous percevons le monde dans son ensemble en sera bouleversée.

II. LA RECHERCHE EN BIOLOGIE THEORIQUE

Les obstacles à la recherche

Parmi les facteurs limitant les efforts de recherche, le manque de temps et l'insuffisance des crédits alloués à la recherche ont été ceux que les répondants ont mentionnés le plus souvent. Ces facteurs sont d'ailleurs étroitement reliés. Ces dernières années, dans plusieurs provinces et universités, les niveaux réels de financement ont baissé en dépit de l'augmentation du nombre d'étudiants, ce qui a entraîné un accroissement de la charge d'enseignement des professeurs et l'érosion des niveaux réels de subventions affectées à la recherche. Aussi une grande partie des subventions des chercheurs doit-elle maintenant servir à acquitter les frais indirects de la recherche, auxquels pourvoyaient auparavant les budgets de fonctionnement universitaires. Pour un grand nombre de chercheurs, ce n'est désormais plus une mince tâche que de maintenir des niveaux acceptables de recherche et de soutenir les travaux des étudiants de deuxième et troisième cycles. Mais il en va de la biologie théorique comme pour bien d'autres domaines; en fait, pour la plupart des chercheurs universitaires canadiens, il s'agit là du problème le plus urgent.

Par opposition à ceux destinés à la collecte de données expérimentales, les crédits affectés à la biologie théorique en particulier sont, sous bien des aspects, peu élevés, ce qui se traduit pour les chercheurs par des restrictions au niveau de la participation à des conférences et de la disponibilité d'aides informatiques. Par exemple, les théoriciens dont les travaux de recherche comprennent la modélisation et la simulation de systèmes biologiques, y compris l'interface avec les données expérimentales pour créer de nouveaux modèles servant à la conception expérimentale, ont parfois besoin de beaucoup de temps machine et de l'aide de spécialistes en informatique. Or, les réductions ou les restrictions dont font l'objet les ressources informatiques dans bien des universités, suite aux compressions budgétaires, viennent freiner leurs travaux.

Il y a un autre facteur limitatif important : trop peu d'étudiants de deuxième et troisième cycles possèdent les compétences nécessaires en mathématiques, par suite des lacunes de la formation mathématique donnée aux étudiants de biologie de premier cycle. Peut-être la façon dont on enseigne souvent la biologie dans les écoles secondaires est-elle à l'origine de ces lacunes. La biologie y est en effet traitée comme une science non mathématique donnant préséance à l'observation et à la description, plutôt que comme une science régie par des concepts et des principes unificateurs. En physique et en chimie, par contre, on insiste sur le fondement mathématique des lois universelles. Ainsi, les étudiants doués en mathématiques et aptes à comprendre des concepts abstraits choisissent habituellement la chimie ou la physique de préférence à la biologie comme programme universitaire. Plusieurs répondants ont souligné que leurs propres lacunes

en mathématiques limitaient leur travail et ont fait l'observation, maintes fois entendue, que la biologie théorique est compliquée et repose sur une combinaison de compétences et de connaissances difficiles à acquérir.

Font vraisemblablement défaut aussi la reconnaissance, par les pairs, de l'importance de la théorie en recherche biologique et l'appui des départements dans ce domaine. Au sein de la collectivité des biologistes, on semble faire peu de cas des théoriciens. Et, problème de taille, les théoriciens collaborent peu entre eux, ratant ainsi l'occasion de bénéficier des conseils désintéressés et informés de leurs pairs. L'attitude chauvine des scientifiques universitaires face aux chercheurs de l'extérieur y est pour quelque chose; si l'on arrivait à changer cette attitude, nul doute que la recherche en biologie théorique s'en porterait mieux. Il faudrait aussi que les revues et les publications portant sur la biologie accordent plus d'attention aux questions théoriques et mathématiques, et que les ressources des bibliothèques soient augmentées.

Les facteurs favorisant la recherche

Les facteurs suivants favorisent la recherche en biologie théorique :

- la collaboration avec des collègues, y compris des expérimentalistes et des cliniciens;
- l'appui du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et du Conseil de recherches médicales du Canada (CRMC);
- la qualité des étudiants de deuxième et troisième cycles;
- l'appui des départements, entre autres dans la poursuite de travaux théoriques;
- l'accès à des ordinateurs plus puissants;
- les progrès dans le domaine des logiciels.

Bien que difficile à réaliser, la collaboration entre théoriciens et expérimentalistes constitue un préalable à l'avancement véritable de la théorie. L'accumulation rapide de données empiriques n'est possible que grâce aux méthodes théoriques, qui assurent organisation et cohérence. De même, pour vérifier la validité de leurs théories et de leurs modèles, les théoriciens comptent sur les résultats des travaux expérimentaux. La collaboration se fait habituellement de façon informelle, avec un ou deux collègues. Rares sont les groupes ou équipes de recherche qui peuvent bien fonctionner ensemble au sein de ce qu'on appelle une masse critique. Dans ce contexte, des réunions ou des ateliers s'imposent. L'échange d'idées est vu comme un élément important de l'élaboration d'approches théoriques en réponse aux problèmes biologiques.

L'accès aux ordinateurs et l'existence de logiciels appropriés comptent aussi beaucoup pour les modélisateurs de systèmes qui utilisent les ordinateurs à des fins expérimentales et théoriques, mais moins pour les chercheurs dans le domaine de la théorie formelle et des biomathématiques abstraites, dont les travaux ne comportent peut-être pas d'aspects informatiques ou expérimentaux connexes.

Le financement de la recherche

Pour que s'établisse et se développe une base solide de recherche théorique en biologie au Canada, il faut disposer de suffisamment de crédits pour appuyer les projets de recherche valables et la formation des étudiants de deuxième et troisième cycles. Car les subventions de recherche, qui sont accordées au mérite à des membres du corps enseignant ou à des groupes de chercheurs, après examen par des pairs, permettent d'assumer le gros des frais directs de la recherche et de la formation du personnel de recherche.

On a tenté, dans le sondage, d'évaluer la justesse et l'efficacité des méthodes actuelles d'aide à la recherche en biologie théorique en demandant aux scientifiques des renseignements au sujet du financement de leur recherche et des difficultés rencontrées dans l'obtention de subventions. Leurs suggestions concernant les façons d'améliorer le système ont aussi été sollicitées. Moins de la moitié des scientifiques ont répondu que leur financement était adéquat. Les autres croyaient que les crédits alloués ne suffisaient pas à appuyer les recherches des étudiants de deuxième et troisième cycles et des boursiers postdoctoraux, et par con-

séquent ne permettaient pas de maintenir un niveau acceptable d'activités de recherche.

Mais les théoriciens de la biologie ne sont pas les seuls à souffrir d'un manque de ressources financières : celles-ci feront toujours défaut à un scientifique ou l'autre, quel que soit son domaine. Beaucoup des scientifiques interrogés ont eu du mal à obtenir des subventions à l'appui de travaux nettement théoriques. Les crédits accordés à la recherche sont, la plupart du temps, fonction de la qualité du projet de recherche et du rendement du chercheur. Mais les objectifs de la recherche en biologie théorique sont souvent vagues au départ, et ses méthodologies, souvent non conventionnelles (les méthodologies usuelles de recherches empiriques ne conviennent pas à tous les travaux théoriques), doivent parfois être révisées maintes et maintes fois en cours de route. Prévoir l'issue de l'étude est chose difficile, voire impossible. En réponse au questionnaire, un chercheur a affirmé ceci : "Si vous pouvez décrire un projet théorique en détail, votre travail est fait."

Comme le travail de nature théorique ne produit pas nécessairement de résultats concrets dans une année donnée, les évaluations basées sur la productivité du chercheur risquent de désavantager celui-ci. En outre, certains chercheurs ont le sentiment que le parti pris en faveur des recherches empiriques des comités de sélection nuance l'évaluation des projets à caractère théorique. Estimant qu'aucune subvention ne leur serait accordée, plusieurs ont affirmé qu'ils ne feraient pas de demande de crédits à l'appui d'un projet théorique. "Je n'ai jamais osé présenter une demande concernant un projet purement théorique -- je ne m'attendrais pas à ce qu'il soit subventionné", a écrit un chercheur. Aussi les scientifiques ont-ils précisé qu'ils font en sorte que leurs travaux théoriques comprennent la part requise de collecte de données ou soient effectués pendant les heures normalement consacrées au travail expérimental.

Selon certains chercheurs, les membres des comités de sélection ne sont pas en mesure d'apprécier à leur juste valeur la pertinence et la qualité des projets traitant de biologie théorique, surtout en raison du caractère majoritairement interdisciplinaire des travaux théoriques, mais aussi parce que leur formation dans des disciplines traditionnelles ne les dispose pas à accepter les approches interdisciplinaires. Ainsi, a commenté un chercheur, "les juges siégant dans le groupe des mathématiques trouvent que le projet n'est pas assez mathématique, et ceux du côté de la biologie, qu'il n'est pas assez biologique." Les chercheurs ont proposé la création d'un comité de biologie théorique ou d'un comité de biologie mathématique, qui seraient des sous-comités d'un comité interdisciplinaire et qui auraient tous deux pour objectif d'accroître les crédits directs affectés à la recherche interdisciplinaire à composante mathématique ou théorique.

Les chercheurs ont aussi proposé :

- que les organismes subventionnaires publient des énoncés de principes dans lesquels ils déclareraient leur intention d'examiner plus de recherches théoriques en biologie et d'encourager les expérimentalistes à se prévaloir de la méthodologie théorique pour la conception d'expériences et l'interprétation de données;
- qu'un plus grand nombre de personnes possédant une vaste expérience théorique soient nommées aux comités de sélection, pour faire contrepoids à la tendance de leurs membres de refuser d'appuyer les travaux situés hors du champ de leur compétence;
- qu'un plus grand nombre de jeunes chercheurs soient nommés aux comités de sélection, pour que l'innovation y soit accueillie plus favorablement;
- que des comités spéciaux chargés d'étudier les projets théoriques comportant des travaux interdisciplinaires soient mis sur pied;
- que les spécialistes en biologie théorique soient autorisés à demander des crédits pour acquitter les frais de photocopie, de livres, d'ordinateurs, d'appels interurbains, de voyages pour assister à des conférences ou à des ateliers spécialisés, et d'achat de mini ou de micro-ordinateurs, au besoin.

Plusieurs répondants estimaient que, somme toute, les organismes subventionnaires font du bon travail, eu égard à la nature ingrate du travail d'examen des comités de sélection. A ce sujet, la réponse d'un chercheur est digne de mention : "Pour autant que je sache, le CRSNG fonctionne très bien, compte tenu des limites humaines auxquelles il est forcément astreint. Je m'oppose farouchement à l'idée de subventionner telle ou telle discipline pour la simple raison qu'il s'agit de la biologie théorique ou d'une autre science. La qualité devrait être le seul critère."

Les programmes universitaires

Peu de cours sont spécifiquement consacrés à la biologie théorique. Néanmoins, voici un échantillon représentatif des cours connexes offerts dans différentes universités canadiennes.

Le cours "Initiation à la biophysique" que donne le professeur Geoffrey Hoffmann à l'université de la Colombie-Britannique regroupe des étudiants de premier cycle et des étudiants de deuxième et troisième cycles de physique, et comprend l'étude de la morphogénèse, de la théorie du réseau du système immunitaire et des théories concernant l'origine de la vie. Il s'agit, selon la description qui en est donnée, d'un "cours à l'intention des physiciens (bénéficiant donc d'une formation négligeable en biologie) constituant une initiation aux principes fondamentaux de la biologie moléculaire, assortie d'exemples choisis de cas où des connaissances approfondies en physique et en mathématiques ont permis de résoudre d'importants problèmes biologiques."

A l'université de Toronto, les professeurs Charles J. Lumsden, L.E.H. Trainor et Melvin Silverman donnent un cours intitulé "La théorie physique en biologie : cours interdisciplinaire". Offert à titre optionnel aux étudiants inscrits en dernière année d'un programme comportant une majeure en physique, ce cours a été décrit ainsi dans la revue American Journal of Physics :

> Selon la perspective élaborée, le spécialiste en physique théorique se penche sur la biologie, et le spécialiste des sciences de la vie sur la physique en y cherchant des liens. La réflexion passe des problèmes spécifiquement biologiques aux concepts biologiques, de questions fondamentales de physique et de mathématiques au défi de la théorie et de la modélisation. Des problèmes situés à l'avant-plan de la biologie moderne y sont étudiés en profondeur. L'étude des sciences de la vie (considérée comme négligeable au départ) se fait en parallèle avec celle des interactions entre la physique et la biologie théoriques.[1]

L'annuaire universitaire ajoute qu'à la fin de ce cours "les étudiants qui ne possèdent aucune formation préalable en biologie ont acquis en ce domaine des connaissances considérables intégrées au langage de la physique théorique. Beaucoup d'étudiants entreprennent ensuite des études supérieures en biologie théorique au département de physique."

L'université de Guelph offre un certain nombre de cours de biophysique, dont l'un s'intitule "Biophysique théorique". Selon la définition fournie dans l'annuaire universitaire, ce cours étudie "les applications de la physique et des mathématiques théoriques à plusieurs aspects de la biophysique". Au département de mathématiques, un cours, "Biomathématiques", porte sur "le développement, l'analyse et l'interprétation des modèles mathématiques de phénomènes biologiques, en insistant sur les modèles déterministes, discontinus et continus". L'université offre aussi des cours de deuxième et troisième cycles en biomathématiques. A l'université Dalhousie, certains cours et séminaires d'initiation à la modélisation en biophysique traitent de sujets apparentés à la biologie théorique et, aux deuxième et troisième cycles, des cours informels figurent au programme des biomathématiques. Pourtant, d'après le professeur Robert Rosen, de cette université, la biologie théorique est encore trop négligée.

Le professeur Leon Glass, de l'université McGill, donne à un groupe d'environ 30 étudiants de deuxième année un cours ayant pour titre "Les modèles mathématiques en

biologie". Pour être admis à ce cours, il faut avoir suivi des cours de calcul différentiel et intégral pendant un an. Le professeur Glass y aborde des sujets tels que l'écologie, la physiologie et la biologie cellulaire. En répondant au questionnaire, il a expliqué : "On y étudie les équations à différences finies..., les méthodes graphiques et la théorie de la stabilité. Ce cours (à mon avis) devrait faire partie de la formation des étudiants en biologie... Des cours plus avancés seraient souhaitables, mais ils n'ont pas bien marché à McGill."

Enfin, à l'université Queen's de Kingston, les départements de biologie et de mathématiques offrent conjointement un cours d'un trimestre en biologie, dont la description est parue dans le bulletin "Theoretical Biology/Canada" :

> Placé sous le thème de la stabilité biologique, le cours porte entre autres sur l'analyse de la stabilité en fonction de variables simples ou multiples pour le temps continu ou discontinu, sur les multiplicateurs de La Grange et sur l'analyse des SES [stratégies d'évolution stable]. Aucun manuel n'est utilisé mais on fait ample emploi de polycopiés et de documents empruntés à la réserve de la bibliothèque.[2]

L'apparition de manuels dans une discipline est un signe de la maturité intellectuelle de cette dernière et elle laisse présager la création subséquente d'établissements appropriés. Parmi les manuels dont disposent les étudiants de biologie théorique, Modeling Dynamics Phenomena in Molecular and Cellular Biology (L.A. Segel, presses de l'université Cambridge, 1984) semble porter sur des sujets semblables à ceux abordés par le professeur Glass. Un manuel à l'intention des étudiants québécois du premier cycle en biologie, traitant des approches mathématiques face à la biologie, est en préparation (N. Lacroix, Université Laval, co-auteur). C. Jeffries (consultant) et G. Merriam (université Carleton) sont co-auteurs de A Workshop in Mathematical Modelling for Students of Ecology.

Que peut-on faire pour préparer les étudiants au travail en biologie théorique? De toute évidence, il faudrait que les étudiants en biologie du premier cycle bénéficient de plus de cours de mathématiques -- cours qu'ils ne suivraient pas normalement. On pourrait aussi, dans les cours de mathématiques du premier cycle, surtout les cours de calcul différentiel et intégral, emprunter des exemples à la biologie et non plus seulement à la physique ou au génie. Outre des cours de mathématiques, les étudiants devraient aussi suivre des cours de physique et de chimie physique, ainsi que des cours spéciaux traitant des aspects mathématiques et biophysiques, de même que de la théorie de la biologie. Il faut chasser des écoles secondaires l'idée que la biologie a très peu en commun avec la physique et les mathématiques. Ainsi, les enseignants pourraient mettre à la disposition des élèves (même au secondaire) des micro-ordinateurs leur permettant de manipuler des modèles mathématiques simples, modèles qui pourraient être complexifiés au fur et à mesure de l'avancement de l'élève (et de l'enseignant). Les cours de biologie devraient englober des concepts appartenant à la philosophie des sciences de façon à préparer les étudiants à être autre chose que des amateurs de gadgets et de données. Bien entendu, c'est le temps qui nous dira si ces mesures auront été efficaces. Dans un cas, par exemple, l'introduction de la biologie théorique dans les cours de mathématiques a soulevé les protestations vigoureuses du département de biologie, tandis que dans un autre, l'inscription des mathématiques au programme de biologie n'a pas produit de grands résultats sur le plan de la théorie.

On devrait informer les étudiants de deuxième et troisième cycles de l'application des mathématiques à la recherche biologique moderne, mais pour cela, il faut bénéficier du personnel nécessaire. Les professeurs devraient dispenser des cours de deuxième et troisième cycles dans leur domaine d'intérêt pour que les étudiants puissent apprendre tous les mécanismes de la théorie. Des cours en génie et en statistique pourraient être de bons préalables à la maîtrise, en plus de

préparer au doctorat. Aux cycles supérieurs, il conviendrait de rehausser le prestige de la biologie théorique en ne la traitant plus comme simple sujet de lecture. Peut-être les facultés pourraient-elles inviter des conférenciers en biologie théorique, préparer des listes de lecture et faire circuler des listes d'anthologies préparées par des enseignants.

III. REFLEXIONS SUR LES ORIENTATIONS A PRENDRE

Comme elles ne touchent en gros qu'une partie de la recherche effectuée dans le vaste domaine de la biologie, les observations faites dans la présente étude ne contribuent que partiellement à la formulation d'une politique scientifique globale en biologie. Cependant, les progrès théoriques étant d'une importance particulière pour la biologie, il serait bon que les biologistes suivent l'évolution des politiques ayant une incidence sur la biologie théorique. Les spécialistes en cette matière font face à des questions sérieuses et urgentes, qui exigent réflexion et action, concernant la mise en oeuvre de leurs recherches. Nombre d'entre eux participent au processus continu de la formulation de politiques. Déjà, les bienfaits de ce processus se font sentir. Ainsi la biologie théorique -- qui comprend la soi-disant biologie mathématique -- est maintenant clairement établie au Canada, ce qui n'était pas le cas en 1971. Dans une étude de documentation au sujet de la biologie, effectuée pour le Conseil des sciences, on faisait remarquer ceci :

> La biologie théorique et la biologie des appareils anatomiques suscitent énormément d'activité depuis peu... Le Canada vient bien loin en arrière dans divers secteurs des mathématiques appliquées... En général, compte tenu des possibilités, peu de chercheurs utilisent les mathématiques dans leurs travaux de biologie. Tout comme en biologie cellulaire et en biologie moléculaire, nous avons besoin de spécialistes en biologie mathématique, ne serait-ce que pour nous tenir au courant des techniques de plus en plus complexes et des possibilités de la science de demain.[1]

La présente étude témoigne du rôle actif que joue la biologie théorique dans la science canadienne contemporaine. Mais, pour ceux qui participent à sa création, l'appui politique semble diffus et peu efficace. Il convient donc de conclure ce bref examen de la santé de la biologie théorique par quelques réflexions sur certains éléments formant ce que l'on pourrait appeler la dynamique politique, dont les chercheurs sont les grands intervenants. Trois éléments méritent notre attention : la communication et la collaboration entre les expérimentalistes et les théoriciens; la formation d'une association ou d'une société de spécialistes en biologie théorique au Canada, et, naturellement, les niveaux et les mécanismes de financement de la recherche.

La communication et la collaboration entre les spécialistes en biologie expérimentale et les spécialistes en biologie théorique

Depuis une dizaine d'années, la biologie théorique fait en quelque sorte cavalier seul, au grand regret des théoriciens. C'est pourquoi la pauvreté des communications entre les expérimentalistes et les théoriciens préoccupait grandement les participants à l'atelier, et les répondants au sondage l'ont placée au huitième rang parmi les

facteurs limitant la recherche théorique, tout en classant la communication efficace au premier rang pour ce qui est des facteurs favorisant la recherche.

Même si les théoriciens ne forment qu'une faible proportion de la collectivité des biologistes, leurs travaux de recherche étendent très loin leurs ramifications. Cela est sans doute vrai aussi des spécialistes de la chimie théorique ou de la physique théorique. Dans ce dernier cas cependant, il existe une relation plus étroite entre théoriciens et expérimentalistes, qui tient d'une part au fait que les mathématiques nécessaires à la science s'assimilent plus facilement et, d'autre part, qu'il faut posséder beaucoup de notions théoriques pour être en mesure de concevoir et d'interpréter les expériences. La théorie et l'expérience y forment un tout presque indivisible et il y a plus d'uniformité au niveau des développements conceptuels, du moins d'ici à ce qu'un grand changement de paradigme se produise. (Au Canada, deux secteurs de la biologie théorique sont particulièrement susceptibles de connaître un changement de paradigme, soit la biologie développementale et l'application de la dynamique non linéaire à un éventail de problèmes, notamment cliniques.) Ce sont des chercheurs en mathématiques, en chimie et en physique qui appliquent les techniques mathématiques à la biologie, et il peut être difficile pour eux d'établir des liens avec les biologistes et de mettre ces techniques à leur portée. La nécessité de rapprocher théoriciens et expérimentalistes de telle sorte que les spécialistes en mathématiques puissent apprendre les notions biologiques requises et que les biologistes puissent faire appel aux mathématiques semble s'imposer. Et il s'agit d'une entreprise de taille qui doit être mise de l'avant de concert avec d'autres mesures politiques.

Comment, au Canada, peut-on réaliser un tel lien? Peut-être tout bonnement en laissant les choses suivre leur cours après avoir créé les conditions appropriées. La situation n'est pas dans un équilibre parfait, mais elle n'est pas non plus fondamentalement instable; il doit bien y avoir un moyen de trouver un nouveau point d'équilibre et de sortir de l'isolement actuel.

Pour ce faire, il faut d'abord sensibiliser davantage les personnes directement intéressées à la biologie théorique. Le language mathématique des théoriciens, parce qu'exotique, semble poser un obstacle à cette sensibilisation. Si c'est le cas, d'autres languages s'imposent. Car il faut se rappeler que les spécialistes de la biologie théorique se servent non seulement de modèles et de simulations mathématiques dans leurs recherches, mais aussi d'idées, de concepts et de principes. Certains d'entre eux étudient des structures conceptuelles qui, pour ainsi dire, capturent les phénomènes biologiques dans des filets mentaux, et, de surcroît, offrent de nouvelles voies d'exploration aux empiristes. Ceux-ci pourraient partager leur vaste expérience des organismes vivants avec les théoriciens, ce qui profiterait aux deux. Pour guider leurs recherches, les expérimentalistes recourent souvent à des théories ou à des concepts explicatifs qui leur sont propres. Le language dont disposent à la fois les théoriciens et les expérimentalistes est constitué d'un ensemble d'idées, de concepts et de principes qui sont en évolution constante et qui guident leurs travaux et leur donnent un sens.

La dynamique, puissant instrument conceptuel commun à plusieurs domaines scientifiques, offre une autre voie. Cela ne veut pas dire que tous doivent se mettre sans tarder à l'étude de la dynamique (même si celle-ci pourrait permettre d'examiner des systèmes complexes sous une nouvelle perspective), mais il vaut la peine de signaler une remarquable collection de volumes illustrés portant sur la dynamique et intitulés The Visual Mathematical Library. D'après leurs auteurs, Ralph Abraham et Christopher Shaw, "tous [les livres de la série] sont destinés à un grand public et ne requièrent aucune formation préalable en mathématiques ou en sciences[2]." Ils ne contiennent que des mathématiques visuelles présentées sous forme de graphiques et de dessins illustratifs habilement exécutés et permettant à tous d'acquérir une connaissance pratique de la dynamique non linéaire et de son application

à plusieurs domaines. C'est là un nouveau langage intéressant. D'autres langages s'offrent sans doute à ceux et à celles qui s'intéressent aux recherches de base et qui tentent de trouver des formules plus transparentes pour communiquer des notions mathématiques. Grâce aux nouveaux logiciels facilement utilisables, les expérimentalistes peuvent acquérir une expérience pratique de la simulation et de la modélisation. Aujourd'hui, on se demande si les techniques informatiques sont utiles aux théoriciens ou aux expérimentalistes -- ambiguité profitable. En fait, tant les expérimentalistes que les théoriciens peuvent se servir des ordinateurs pour approfondir des systèmes complexes, que ce soit des galaxies, des membranes cellulaires ou des modèles mathématiques.

On pourrait aussi, à l'occasion, tenir des ateliers mixtes. Ces ateliers auraient ceci de particulier qu'ils tenteraient notamment de préciser les liens qui existent entre la théorie et l'expérimentation par des moyens qui seraient à la portée de tous les participants. La spécialisation ne devrait pas poser de problèmes mais, dans le cas contraire, il faudrait présenter les communications générales au début, ou mettre en évidence la communication d'idées et de concepts communs à divers sous-domaines. On devrait publier le compte rendu des ateliers. Peut-être aussi qu'un jour une publication consacrée à ces communications prendra forme, ou qu'un ou deux bulletins savants commenceront à circuler au sein de la collectivité des biologistes, pour aboutir sur les bureaux des physiciens, des chimistes et des mathématiciens, qui participeront tous sur un pied d'égalité avec les théoriciens à l'élaboration d'une structure théorique permettant de comprendre les systèmes vivants.

Ces efforts -- l'insistance sur la structure conceptuelle, la recherche de moyens d'exprimer les idées mathématiques sous des formes accessibles, et la tenue d'ateliers mixtes à l'intention des expérimentalistes et des théoriciens -- doivent recevoir l'appui financier des organismes subventionnaires, car ce sont des éléments essentiels à la santé de la biologie au Canada. Pour leur part, les diverses associations de biologistes, et peut-être aussi de scientifiques d'autres disciplines, doivent jouer un rôle actif en favorisant la communication et la collaboration entre scientifiques empiristes et théoriciens. On peut imaginer sans peine la création d'un institut canadien de biologie théorique se proposant de faire avancer la théorie et d'encourager les contacts et les échanges avec les autres disciplines. Dans ce contexte, la recommandation formulée par les participants à l'atelier* concernant la formation d'une société de spécialistes de la biologie théorique au Canada prend tout son sens.

La société canadienne de biologie théorique

Une conférence en vue de lancer une société canadienne de biologie théorique doit se tenir à Montréal en juin 1985. Il est encore trop tôt pour connaître précisément la forme que prendra cette société et le mandat que ses membres se donneront, mais sa fondation prochaine est éloquente : elle indique aux décideurs politiques canadiens que la discipline de la biologie théorique est en train de prendre pied.

Trois fonctions lui incomberont sans contredit. D'abord, elle servira de point de rencontre entre les spécialistes de la biologie théorique, rôle d'autant plus important que les spécialités qu'elle réunit sont nombreuses. Elle favorisera la collaboration entre les théoriciens et, à tout le moins, tentera de remédier à ce sentiment néfaste d'isolement qui règne chez eux. Ce sera aussi une excellente tribune où les questions de cours et de séminaires universitaires en biologie théorique pourront être débattues et qui débouchera peut-être sur une publication renfermant des sommaires ou des exposés que tous peuvent lire et comprendre. La tâche de créer un réseau informatique pouvant servir à visualiser des structures mathématiques pourrait aussi lui incomber.

---

* Comme il a été dit plus haut, le présent document fait essentiellement état des conclusions de l'Atelier sur la biologie théorique qui s'est tenu à Ottawa les 25 et 26 novembre 1983. Cet atelier était parrainé par le Conseil des sciences du Canada et le Conseil national de recherches du Canada.

Ainsi, sa première fonction serait sans doute d'encourager le dialogue interne et l'échange d'idées.

Deuxièmement, cette société favorisera le dialogue avec l'extérieur, particulièrement avec les spécialistes de la biologie expérimentale. La publication qu'on vient de mentionner pourrait justement être le véhicule de ce dialogue. Chose certaine, il faut à celui-ci un moyen d'expression efficace : rencontre, atelier ou publication quelconque où une société de biologie théorique pourrait jouer un rôle prédominant.

Troisièmement (il est à remarquer qu'on ne procède pas ici par ordre d'importance), la société serait en mesure de diriger et de conseiller les chercheurs quant à la marche à suivre pour obtenir des crédits de recherches. Elle pourrait aussi amorcer des échanges avec les organismes subventionnaires pour faire en sorte que ceux-ci abordent l'étude des projets de recherche en biologie théorique d'un point de vue plus juste et mieux informé.

Le financement de la recherche

La plupart des répondants au sondage estiment que, pour maintenir ses activités à un niveau acceptable, la recherche devrait bénéficier de plus de crédits. Ce sont dans une grande mesure les boursiers postdoctoraux et les étudiants de deuxième et troisième cycles qui participent aux activités de recherche. Or, étant donné le niveau actuel des subventions, les chercheurs ne peuvent soutenir financièrement un nombre suffisant d'assistants au niveau des deuxième et troisième cycles. Peut-être cette question semble-t-elle sans conséquence, mais elle pose en fait un grave problème. A cause des lacunes existant dans les mécanismes actuels d'octroi de crédits, nombre de chercheurs en biologie théorique ne demandent pas d'aide financière directe à l'appui de projets théoriques mais combinent plutôt ceux-ci à des travaux expérimentaux ou théoriques, pour lesquels il est plus facile d'obtenir des fonds. Une association de spécialistes en biologie théorique pourrait aider les chercheurs à faire des demandes de fonds pour effectuer des travaux spécifiquement théoriques, et communiquer aux organismes subventionnaires les connaissances et l'expérience qui leur permettraient peut-être de sensibiliser les membres de leur comité de sélection aux besoins des spécialistes en biologie théorique. Aux Etats-Unis, les subventions accordées dans le domaine des sciences biophysiques sont gérées par les instituts nationaux de santé, par le biais des comités réguliers. Mais dans le cas des demandes de subventions extraordinaires, qui se situent à la croisée de plusieurs sciences, des comités spéciaux sont constitués à partir d'une équipe d'experts de domaines variés, des mathématiques à la médecine clinique.[3] Une société canadienne pourrait fournir à ces organismes les noms des personnes habilitées à siéger à ces comités spéciaux, ce que les membres diligents des comités de sélection apprécieraient sans aucun doute. Dans ce cas encore, il est important d'enrichir le dialogue entre expérimentalistes et théoriciens, étant donné que les expérimentalistes prédominent dans les quatre comités de sélection de biologie du CRSNG. (A noter que la biologie théorique a la faveur de neuf comités de sélection du CRSNG, en plus de recevoir l'appui du CRM et d'autres instances.)

Tout cela doit évidemment être analysé dans le contexte des compressions budgétaires fédérales et provinciales dont a souffert l'enseignement supérieur, et de l'incidence de ces compressions sur la recherche. Un bouleversement d'une ampleur inconnue semble se profiler dans la plupart des secteurs de recherche universitaire, et les problèmes que pose la recherche en biologie théorique ne sont pas étrangers à ce phénomène.

Pour conclure sur une note plus gaie, ajoutons que la communauté canadienne des spécialistes en biologie théorique démontre toute l'énergie et tout l'enthousiasme nécessaires pour affronter le défi que pose la recherche interdisciplinaire aux frontières infiniment subtiles de la vie.

ANNEXE 1 -- ORDRE DU JOUR DE L'ATELIER SUR LA BIOLOGIE THEORIQUE*

Vendredi, 25 novembre, avant-midi : L'IMPACT DE LA THEORIE EN BIOLOGIE

Président : M. Raymond L. Somorjai
Division de la chimie
Conseil national de recherches du Canada

9 h — Allocution inaugurale

M. Claude T. Bishop
Directeur, Division des sciences biologiques
Conseil national de recherches du Canada

et

M. James Gilmour
Directeur de la recherche
Conseil des sciences du Canada

9 h 15 — Présentation du thème

M. Colin W. Clark
Directeur intérimaire
Institut de mathématiques appliquées et de statistique
Université de la Colombie-Britannique

9 h 30 - 12 h 30 — Discussion

12 h 30 — Repas

Vendredi, 25 novembre, après-midi : ECHANGE D'IDEES AU SUJET DES RECHERCHES EN COURS

Président : M. Michael Zuker
Division des sciences biologiques
Conseil national de recherches du Canada

14 h 30 - 17 h 30 — Echange et discussion

Samedi, 26 novembre, avant-midi : QUESTIONS PRATIQUES ET ELABORATION D'UNE POLITIQUE

Président : M. Paul J. Buckley
Conseil des sciences du Canada

9 h - 12 h — Discussion

* Tenu à Ottawa les 25 et 26 novembre 1983

ANNEXE 2 -- LISTE DES PARTICIPANTS A L'ATELIER

M. P. Antonelli, département de mathématiques, université de l'Alberta

M. C.W. Clark, Institut de mathématiques appliquées, université de la Colombie-Britannique

M. J. Dainty, département de botanique, université de Toronto

M. J.R. Derome, département de physique, Université de Montréal

M. L. Glass, département de physiologie, université McGill

M. B. Goodwin, visiteur de la Grande-Bretagne (université du Sussex)

M. L.G. Harrison, département de chimie, université de la Colombie-Britannique

M. W.G.S. Hines, département de mathématiques et de statistique, université de Guelph

M. A.H. Louie, consultant d'Ottawa

M. C.J. Lumsden, faculté de médecine, université de Toronto

M. M.C. Mackey, département de physiologie, université McGill

M. R. Miura, Institut de mathématiques appliquées, université de la Colombie-Britannique

M. P. Pirlot, département de sciences biologiques, Université de Montréal

M. R. Rosen, département de physiologie et de biophysique, université Dalhousie

M. D. Sankoff, Centre de recherches en mathématiques appliquées, Université de Montréal

M. W. Silvert, Division d'écologie marine, Bedford Institute of Oceanography

M. W.R. Smith, département de mathématiques et de statistique, université de Guelph

M. R.L. Somorjai, Division de la chimie, Conseil national de recherches

M. L.E.H. Trainor, département de physique, université de Toronto

M. P. Van den Driessche, département de mathématiques, université de Victoria

M. M. Zuker, Division de la biologie, Conseil national de recherches

M. M.J. Zuckermann, département de physique, université McGill

ANNEXE 3 -- QUESTIONNAIRE DU SONDAGE

CONFIDENTIEL

Pour aider le Conseil des sciences du Canada à mieux comprendre la situation actuelle de la biologie théorique, nous vous saurions gré de remplir le questionnaire suivant et de le retourner, dans l'enveloppe ci-jointe, à l'adresse suivante :

Sondage auprès des spécialistes en biologie théorique
Conseil des sciences du Canada
100, rue Metcalfe
Ottawa (Ontario)
K1P 5M1

0. Nom

1. Etudes

Etudes supérieures

- Université
- Pays
- Domaine d'intérêt principal
- Années écoulées depuis le dernier diplôme

2. Situation professionnelle

- Poste
- Institution
- Proportion du temps consacrée à la recherche
  1/4 1/2 3/4 1
- Proportion du temps de recherche consacrée à la biologie théorique
  1/4 1/2 3/4 1
- Proportion du temps de recherche consacrée à la collaboration avec des spécialistes en biologie théorique
  1/4 1/2 3/4 1
- Proportion du temps de recherche consacrée à la collaboration avec d'autres biologistes
  1/4 1/2 3/4 1

3. Donnez le nombre de boursiers postdoctoraux et d'étudiants de deuxième et troisième cycles collaborant à vos recherches.

   Indiquez leur discipline de base.

   Indiquez aussi le domaine d'activité actuel ou l'emploi des anciens boursiers et étudiants.

4. Domaines d'intérêts de recherche en biologie théorique (Brève description; une ou deux publications récentes ou références).

5. Facteurs restreignant vos efforts de recherche en biologie théorique.

6. Facteurs favorisant vos efforts de recherche en biologie théorique.

7. Financement :

   Indiquez les principales sources et niveaux de financement de vos recherches (CRSNG, CRM, autres).

   Le niveau de financement de vos recherches est-il adéquat, à l'heure actuelle?

   Connaissez-vous les procédures d'octroi de subventions du CRSNG ou du CRM qui s'appliquent à vos recherches?

   Décrivez les problèmes auxquels vous avez fait face en tentant d'obtenir des subventions de recherche en biologie théorique.

   Pouvez-vous faire des suggestions pour améliorer les procédures actuelles d'octroi de subventions?

8. Comment percevez-vous l'impact de la biologie théorique sur la biologie fondamentale, la biologie appliquée et les disciplines connexes?

9. Quelles suggestions feriez-vous pour intégrer la biologie théorique aux programmes de biologie aux niveaux du premier cycle et des deuxième et troisième cycles?

ANNEXE 4 -- QUELQUES RESULTATS DU SONDAGE

1. On a demandé aux répondants de faire état des sources et des crédits dont ils disposaient pour mener des travaux en biologie théorique. (Comme on l'a vu, certains chercheurs arrivent à financer des recherches théoriques en y ajoutant des travaux expérimentaux pour lesquels il est facile d'obtenir des crédits.) Pour l'année 1982-1983, les sommes déclarées par 48 répondants s'élevaient à 1 601 098 $. La source de financement la plus importante pour la biologie théorique était le CRSNG, qui a versé 744 688 $ en subventions de fonctionnement à des particuliers, et 288 000 $ à des groupes de chercheurs, ou sous forme de matériel ou de subventions thématiques. En biologie théorique, la subvention de fonctionnement moyenne du CRSNG se chiffrait à 23 271 $. Le CRM a financé cinq projets en biologie théorique pour un total de 148 000 $. Enfin, 429 430 $ provenaient d'autres sources : du ministère des Pêches et des Océans (deux subventions), de sources universitaires internes, de provinces et de fondations. Le financement de cinq répondants travaillant au ministère des Pêches et des Océans n'est pas compris dans ces chiffres.

2. Vingt-deux subventions ont été accordées par les quatre comités de sélection de biologie du CRSNG : biologie des populations (12); biologie animale (6); biologie des cellules et génétique (3); biologie des plantes (1). Cela représente approximativement 65 pour cent du nombre total des subventions du CRSNG qui ont été citées. Le reste, soit 35 pour cent, a été réparti ainsi : mathématiques pures et appliquées (5); domaines interdisciplinaires (4); physique (1); statistique (1); informatique et sciences de l'information (1).

3. A la question posée aux chercheurs pour connaître la proportion du temps qu'ils pouvaient consacrer à la biologie théorique, 74 pour cent ont déclaré affecter 50 pour cent de leur temps de recherche à la biologie théorique, et 36 pour cent y consacraient au moins 75 pour cent de leur temps de recherche.

4. Pour un total de 48 chercheurs, il y avait 27 boursiers postdoctoraux et 89 étudiants de deuxième et troisième cycles.

5. Des 44 scientifiques qui ont répondu à la question, environ la moitié ont fait leurs études supérieures aux Etats-Unis, 16 au Canada et 6 dans d'autres pays.

6. Les résultats de recherches en biologie théorique ont paru dans 35 publications, dont voici une liste partielle :

Theoretical Population Biology
Journal of Theoretical Biology
Theoretical Applied Genetics
Evolutionary Theory
Progress in Theoretical Biology
Bulletin of Mathematical Biology
Mathematical Biosciences
Proceedings of the Royal Society
Annual Review of Physical Chemistry
Foundations of Physics
Journal of Molecular Biology
Systematic Zoology
Canadian Journal of Zoology
American Journal of Physiology
North American Journal of Fish Management
Acta Biotheoretica
Journal of Mathematical Biology
Journal of Inferential and Deductive Biology (à venir)

7. Les répondants ont fait plusieurs observations intéressantes à propos de la recherche en biologie théorique. En voici un échantillon :

> La biologie théorique est à peu près le seul moyen d'étudier plus d'une question à la fois.

> [Il faut] établir des liens entre la collectivité des mathématiciens et celle des biologistes; [les représentants des deux groupes pourraient

alors] suggérer des façons de partager leurs subventions...

Je pense que la biologie demeurera toujours une science moins quantitative que la physique, par exemple. Mais je crois qu'avec le temps la biologie théorique gagnera en importance et sera de plus en plus acceptée.

L'important, c'est que la clientèle réceptive aux approches théoriques et mathématiques de l'étude des systèmes biologiques croît très rapidement. Par conséquent, le climat intellectuel qui règne dans les sciences biologiques, surtout au sein de la jeune génération de chercheurs, est généralement accueillant et riche.

Tout le savoir et les travaux expérimentaux actuels en océanographie biologique reposent sur les paradigmes de l'écologie théorique. Les biologistes ne peuvent par réellement trouver d'explications possibles à leurs observations si ces explications sortent du cadre d'évolution et de concurrence logistique de Lotka-Volterra.

NOTES

Préface

1. Observation faite par un participant à l'atelier sur la biologie théorique tenu à Ottawa les 25 et 26 novembre 1983.
2. Paul Pirlot, professeur au département de sciences biologiques, Université de Montréal.

II. La recherche en biologie théorique

1. American Journal of Physics 47 (avril 1979), 302.
2. "Theoretical Biology/Canada", n° 2 (janvier 1985), 5 (rédigé par Michael C. Mackey, département de physiologie, université McGill).

III. Réflexions sur les orientations à prendre

1. P.A. Larkin et W.J.D. Stephen, Du formol au Fortran -- La biologie au Canada. Etude de documentation n° 18 du Conseil des sciences du Canada (Ottawa, Information Canada, 1971), 28-29.
2. Ralph H. Abraham et Christopher D. Shaw, Dynamics: the Geometry of Behavior. Part 1: Periodic Behavior (Santa Cruz, Californie, Aerial Press Inc., 1981), notes de la couverture.
3. M.C. Mackey (professeur de physiologie, université McGill), communication personnelle.